

THESIS

MUNICH

1968

Die Laufbandarbeit
als Belastungsprüfung für
Herz, Kreislauf und Atmung.

LANE MEDICAL LIBRARY
STANFORD UNIVERSITY
MEDICAL CENTER
STANFORD, CALIF. 94305

WOLFGANG DRESCHER 1968

Aus dem Flugmedizinischen Institut der Luftwaffe
in Fürstenfeldbruck

(Leiter: Generalarzt Dr. E.A. Lauschner)

und

der Sportmedizinischen Abteilung (Prof. M. Pöschl)
der Chirurgischen Klinik der Universität München

Direktor: Prof. Dr. R. Zenker

Die Laufbandarbeit als Belastungsprüfung
für Herz, Kreislauf und Atmung

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
verfaßt und einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Wolfgang Drescher

1968

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter : Priv.Doiz. Dr. H.W. Kirchhoff

Mitberichterstatter: Prof. Dr. M. Pöschl

Dekan : Prof. Dr. F. Marguth

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.68

Inhaltsverzeichnis

A. Einleitung

B. Methodik

- 1.) Verwendete Apparaturen
- 2.) Untersuchungsgut
- 3.) Untersuchungsgang
- 4.) Statistische Auswertung

C. Ergebnisse

- I. Das Verhalten der Ventilations- und Kreislaufgrößen bei Personen durchschnittlicher Leistungsbreite bei konstanter Schrittgeschwindigkeit und verschiedenen Neigungswinkeln.
- II. Das Verhalten der Ventilations- und Kreislaufgrößen bei verschiedenen Schrittgeschwindigkeiten und Neigungswinkeln.
- III. Vita maxima Untersuchungen am Laufband.
- IV. Vergleichende Untersuchungen über die maximale Leistungsfähigkeit bei Laufband- und Ergometerarbeit.
- V. Energetische Betrachtungen.

D. Diskussion

E. Zusammenfassung

F. Anhang

G. Literaturverzeichnis

A. Einleitung

Zu einer modernen Funktionsdiagnostik von Kreislauf und Atmung gehört heutzutage die Ergometrie und Spiroergometrie. Die Arbeitsversuche können an einem Fahrradergometer in sitzender bzw. liegender Stellung, an einer Stufentreppe oder an einem Drehkurbelergometer durchgeführt werden. Gemessen werden dabei Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxydabgabe, Atemminutenvolumen, Atemäquivalent, respiratorischer Quotient, Blutdruck, Puls und Sauerstoffpuls, deren Verhalten Einblicke gibt in die einzelnen Regulationskreise von Kreislauf und Atmung. Voraussetzung für die Bewertung der einzelnen Parameter ist die Kenntnis des Normalen und seines physiologischen Streubereiches, der je nach Arbeitsform veränderlich ist.

Im Vordergrund der wissenschaftlichen Diskussion stehen immer wieder die Vor- und Nachteile der einzelnen Belastungsarten. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zu dieser Diskussion bringen, indem sie die Laufbandarbeit als moderne und physiologische Belastungsform herausstellt.

Eine Belastungsprüfung sollte den Arbeitsbedingungen und Anforderungen des täglichen Lebens entsprechen. Bei der in Deutschland vorzugsweise üblichen Fahrradergometrie ist dies nur bedingt möglich. Die Arbeitsbelastung am Fahrradergometer erweist sich für viele, vor allem klinische Untersuchungspersonen und auch für Frauen, als ungewohnt und kann daher nicht als physiologisch bezeichnet werden. In den angelsächsischen Ländern, einschließlich den U.S.A., wird vorzugsweise das Laufbandergometer zu Funktionsprüfungen verwendet. Man geht dort davon aus, daß das Gehen die natürlichste Bewegungsform darstellt, und daß es nicht darauf ankommt, absolute Aussagen über die Leistungsfähigkeit des motorischen Apparates zu machen. Wichtiger ist die Aussage über die Größe der Leistungsfähigkeit im Verhältnis zu dem bewegten Körpergewicht, die Prüfung der Leistungsfähigkeit eines Menschen.

Die vorliegende Arbeit teilt Untersuchungsergebnisse mit, die bei Laufbandarbeit mit dem Metabographen von A. FLEISCH bei



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA40153723_0226

Personen durchschnittlicher Leistungsbreite gewonnen wurden. Es werden Einzel- und Mittelwerte für die obengenannten Ventilations- und Kreislaufgrößen mitgeteilt und besprochen. Die Analyse der Ergebnisse gibt Einblick in die Beziehungen der Kreislaufgrößen zueinander, in ihre Funktion bei Ruhe und Belastung. Letztlich ist es auf Grund dieser Analysen möglich, individuelle Leistungsbreiten und Leistungsgrenzen zu erkennen.

B. U N T E R S U C H U N G S M E T H O D I K

1.) Verwendete Apparaturen

Die kombinierten Untersuchungen des Kreislaufs und der Atmung wurden mit dem Metabographen von A. FLEISCH (Firma JAQUET, Basel) durchgeführt (s. Abb. 1). Dieser ermöglicht die gleichzeitige Registrierung der Sauerstoffaufnahme, der Kohlensäureabgabe, des Atemminutenvolumens, des respiratorischen Quotienten, des Atemäquivalentes sowie der Atemfrequenz und des Atemvolumens unter Ruhebedingungen bis zu einer maximalen körperlichen Arbeit. Der besondere Vorteil der Apparatur besteht in der fortlaufenden Registrierung der Kohlensäureabgabe und Sauerstoffaufnahme unter gleichzeitiger automatischer Aufzeichnung des respiratorischen Quotienten ohne rechnerische Berücksichtigung der Temperatur und des Barometerstandes. Der Metabograph stellt ein geschlossenes Kreislaufsystem dar. Mit Hilfe eines speziell konstruierten Doppelspirometers wird das Fördervolumen der Luftpumpe auf die Hälfte reduziert und damit die Stromgeschwindigkeit in den Schläuchen vermindert. Das hat den Vorteil, daß die Druckschwankungen in der Maske erheblich reduziert werden. Die Messung und Registrierung der von der Versuchsperson ausgeschiedenen Kohlensäure geschieht nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsmessung von Kalilauge, die als Absorptionsmittel für CO_2 dient. Die Steuerung erfolgt mit Hilfe einer WHEATSTONE'schen Brücke, wobei je nach Intensität der Kohlensäureausscheidung des Probanden die Zufuhr von Kalilauge so dosiert wird, daß deren Leitfähigkeit konstant bleibt. Es mißt also die Zufuhr frischer Kalilauge, die sich in einem Nebenbehälter befindet, direkt die Kohlensäureproduktion der Versuchsperson.

Abb. 1 Die Versuchsanordnung



Dabei wird das Ergebnis auf 0°C , 760 mm Hg und Trockenheit (STPD = Standard Temperature Pressure Dry) reduziert.

Die Sauerstoffzufuhr, entsprechend der Größe des Verbrauchs, wird über die Einstellung der Spirometerglocke und den Kohlensäureverbrauch gesteuert. Die Ausschläge des Spirogramms während einer bestimmten Zeiteinheit werden mit Hilfe eines Totalisators addiert, so daß dadurch das Atemminutenvolumen bestimmt werden kann. Der Wechsel der Zeitintervalle erfolgt dabei mit dem Zeitschalter des Kymographen von A. FLEISCH und DELAFONTAINE, wobei beliebige Zeitabschnitte (in der eigenen Untersuchung Viertel-, bzw. Halbminutenwerte) ausgewählt werden können. Für die Belastung auf dem Laufband wurde das Laufbandergometer der Firma ROSSEL & SCHWARZ verwendet, bei dem die Möglichkeit der Veränderung der Schrittgeschwindigkeit und des Neigungswinkels besteht.

Die Pulsfrequenz wurde fotoelektrisch mit dem Pulsfrequenzintegrator der Firma PIESKER-RATINGEN registriert, wobei jeweils

nach einer Minute der Pulsfrequenzmittelwert von einer Hilfsperson abgelesen und protokolliert wurde. Mit dem halbautomatischen Blutdruckmeßgerät BPM der Firma ELAG - Köln wurde das KOROTKOFF'sche Geräusch über eine Lautsprecheranlage hörbar gemacht, was eine genauere Bestimmung der Blutdruckwerte ermöglichte, insbesondere im Belastungsversuch. Im einzelnen konnten folgende Kreislauf- und Ventilationsparameter bestimmt werden:

Sauerstoffaufnahme in ml / min	(STPD)
Kohlensäureabgabe in ml / min	(STPD)
Respiratorischer Quotient =	$\frac{CO_2}{O_2}$
Atemminutenvolumen in Liter/min	(BTPS)
Atemäquivalent =	$\frac{A \ M \ V \ x \ 100}{O_2\text{-Aufn. in ml}}$
Pulsfrequenz	Schl / min
systolischer und diastolischer Blutdruck	mm Hg
Sauerstoffpuls =	$\frac{O_2\text{-Aufnahme in ml}}{\text{Herzfrequenz}}$

2.) Untersuchungsgut

- a) Die spiroergometrischen Untersuchungen am Laufband wurden an 170 Personen im Alter von 20 - 25 Jahren durchgeführt. Sie waren durchschnittlich 176 cm groß und hatten ein mittleres Gewicht von 72 kg. Dabei handelte es sich durchweg um Abiturienten (Offiziersanwärter), die sich nach einer Unterrichtung über den Testablauf freiwillig zur Verfügung stellten.

- b) Für die Untersuchung unter vita maxima Bedingungen wurden 20 Personen im Alter von 20-30 Jahren ausgewählt. Der gleiche Personenkreis stellte sich auch für die Vergleichsuntersuchung am Fahrradergometer zur Verfügung.

3.) Untersuchungsgang

- a) Bei einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von 4,5 km/h oder 1,25 m/sec wurden jeweils 6 Messungen unter verschiedenen Winkeln über eine Zeitdauer von 10 Minuten vorgenommen.

Tab. I Prozentangabe für die einzelnen Neigungswinkel

Grad	Prozent
2°	3,5 %
4°	7,0 %
6°	10,5 %
8°	14,0 %
10°	17,4 %
12°	21,0 %

Vor diesen Messungen erfolgte die Messung bei einem Anstellwinkel von 0°, die dazu diente, die theoretisch nicht zu erfassende horizontale Arbeit festzustellen.

Die Untersuchungen wurden unter Ruheumsatzbedingungen vorgenommen. Da es sich um verhältnismäßig kurzfristige Versuche handelt, und da andererseits bei einer normalen Ernährung der Anteil der zu oxydierenden stickstofffreien Eiweißreste relativ zur Menge an Kohlehydraten und Fetten nur klein ist, entsteht durch die Vernachlässigung des Eiweißes ein Fehler,

der im allgemeinen innerhalb der statistisch erlaubten Fehlergrenze liegt, die einem Respirationsversuch gezogen ist. Den Probanden wurden zunächst der Versuchsablauf genau geschildert, danach ruhten sie eine halbe Stunde in einem Nebenraum. Das Anlegen der Gesichtsmaske mit Anschluß an den Metabographen, des Ohrclips für die fotoelektrische Registrierung der Pulsfrequenz und der Blutdruckmanschette erfolgte im Sitzen auf dem Laufband. Nachdem unter minütlicher Registrierung der Ruhewerte Konstanz eingetreten war, wurde zu Beginn einer neuen Registrierminute mit dem eigentlichen Versuch begonnen. Der Proband blieb bei den angegebenen Neigungswinkeln und der festgelegten Schrittgeschwindigkeit auf dem Laufband, wobei darauf geachtet wurde, daß die Arme frei am Körper herunterhingen (s. Abb.2). Es wurde dann die Atmung so lange registriert, bis sich alle Ventilations- und Kreislaufparameter der neuen Belastungsstufe angepaßt hatten, d.h. ein steady state erreicht war (s. Abb.3). Ein steady state war gegeben, wenn alle Meßgrößen mindestens fünf Minuten lang konstant blieben. Die Pulsfrequenz und die Blutdruckwerte wurden von einer Hilfsperson in einminütigem Abstand gemessen. Für jede Arbeitsleistung wurde eine Belastungsdauer von zehn Minuten gewählt, da diese Zeit für den Organismus ausreichend ist, um sich auf ein neues Gleichgewicht einzustellen.

Abb. 2 Die Versuchsanordnung

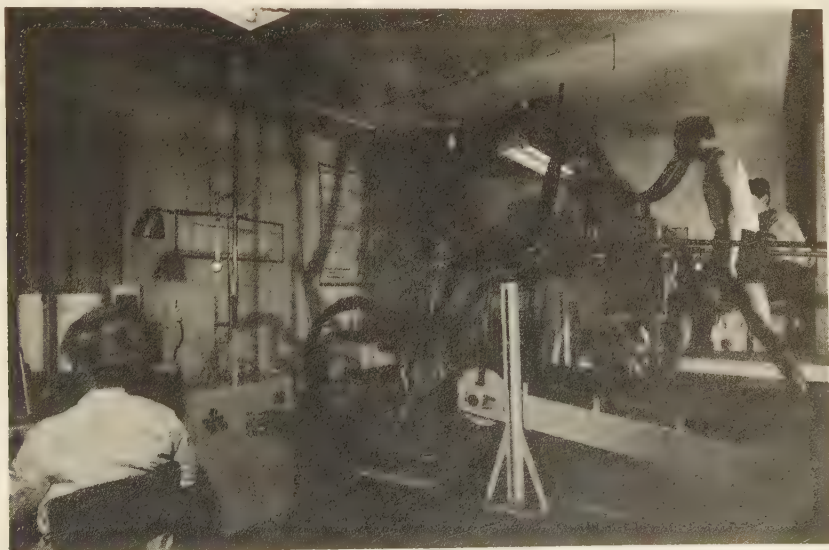
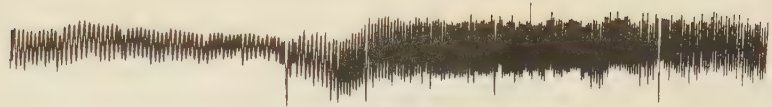
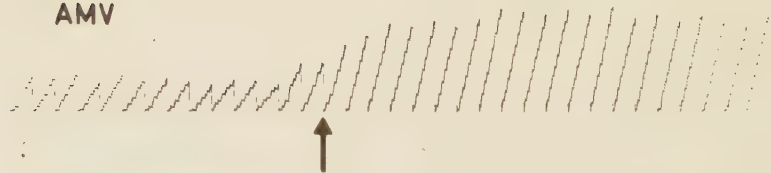


Abb. 3 Darstellung eines Spirogramms

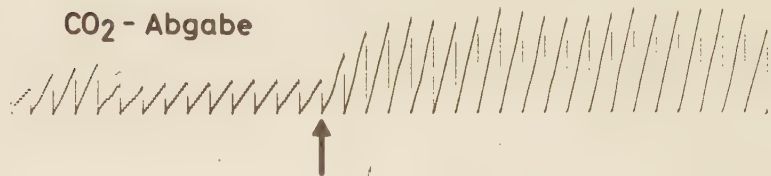
Atemfrequenz und Atemtiefe



AMV



CO₂ - Abgabe



O₂ - Aufnahme



Tab. II Häufigkeitsverteilung der einzelnen Belastungsversuche

Belastungsstufe	Anzahl der Probanden (N)
Ruhe	80
0°	15
2°	15
4°	25
6°	30
8°	30
10°	30
12°	30

b) An einem zweiten Versuchsgang waren drei Probanden beteiligt. Wie in den oben beschriebenen Untersuchungen wurden bei den genannten Steigungswinkeln die einzelnen Kreislaufelemente ermittelt, jedoch wurden die Geschwindigkeiten variiert. So wurde bei Schrittgeschwindigkeiten von 4,5, 7,5 und 10,5 km/h der Steigungswinkel in je einem neuen Versuchsgang solange erhöht, bis ein RQ von 1 erreicht bzw. überschritten war, da mit diesem Wert die Leistungsgrenze erreicht ist (BALKE, KIRCHHOFF, REINDELL 3,6).

Tab. III Angaben zu den untersuchten Personen

Versuchspersonen	Alter	Gewicht	Größe
J. B.	25	64 kg	179 cm
W. D.	26	75 kg	179 cm
H. B.	22	88 kg	179 cm

c) vita-maxima-Arbeit

Die Ruhewerte werden ebenfalls im Sitzen, mit angeschlossener Maske, Ohrclip und Blutdruckmanschette bestimmt. Bei einer Schrittgeschwindigkeit von 6 km/h wird dann minütlich der Neigungswinkel um 1° gehoben und bis zu einem Neigungswinkel von

15⁰ verstellt. War der Proband schon vorzeitig erschöpft, wurde die Untersuchung abgebrochen.

4.) Statistische Auswertung

Die Auswertung der einzelnen Meßkurven erfolgte derart, daß die Ergebnisse jeder Minute gemessen und in ein entsprechendes Versuchsprotokoll eingetragen wurden (s. Anhang). Es folgte die Ermittlung der steady state-Werte der einzelnen Parameter in jeder Belastungsstufe, die zur Errechnung der Mittelwerte für die Sauerstoffaufnahme, Kohlensäureabgabe und das Atemminutenvolumen dienten. Mit Hilfe letztgenannter Größen und der Puls- und Blutdruckmittelwerte wurden durch Quotientenbildung der respiratorische Quotient, das Atemäquivalent und der Sauerstoffpuls ermittelt.

Um Normalwerte zu erhalten, wurden aus jeder Beobachtungsreihe ($X_1 + X_2 + \dots$) das arithmetische Mittel gebildet.

$$M = \frac{\sum x_i}{n}$$

Aufschluß über die dem Mittelwert zugrunde liegende Verteilung gibt die Streubreite :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - M)^2}{n - 1}}$$

Sie dient dazu, festzustellen, ob tatsächlich eine Normalverteilung vorliegt: Es müssen 2/3 der Einzelbeobachtungen innerhalb der Grenzen $M \pm s$ liegen. Dann werden sich aber auch bei wiederholten Untersuchungen die Einzelwerte in 2/3 der Fälle innerhalb der angegebenen Grenzen finden.

Die von jeder Versuchsperson aufzuwendende Energie für einen Zeitraum von einer Minute wurde aus dem Sauerstoffverbrauch berechnet, wobei sich für 1 Liter O_2 /min bei einem RQ von 0,82 ein Brennwert von 4,82 Kilokalorien ergibt. Da 1 Kalorie 4186 Wattsekunden entspricht, resultiert für einen Sauerstoffverbrauch von 1 Liter/min eine Leistung von $4,82 \times \frac{4186}{60} = 336$ Watt.

Die Tatsache, daß sich die Hubleistung bei der Laufbandarbeit über den Sinus des Anstellwinkels ausdrückt, wurde in früheren Arbeiten (WYNDHAM et al. ¹⁷⁾, TABAKIN, HANSEN et al. ⁴⁾) sowohl in der Beurteilung der Ergebnisse als auch bei der graphischen Darstellung nicht berücksichtigt. So wurden immer nur die einzelnen Parameter als Ordinatenwerte gegen die Belastung, auf der Abszisse durch den Neigungswinkel oder mkg/min ausgedrückt, aufgezeichnet.

Bildet man den Quotienten aus einer Kreislauf- bzw. Ventilationsgröße (K) und dem zu leistenden Wattbetrag (L) fortlaufend auf jeder Belastungsstufe, so erhält man einen Index, als sogenannten s p e z i f i s c h e K r e i s l a u f b e l a s t u n g I bezeichnet. In dieser Größe ist die Änderung der Hubleistung mit dem Sinus des Neigungswinkels berücksichtigt. Außerdem gestattet solches Vorgehen einen Einblick in die Variabilität der einzelnen Parameter, gibt Auskunft über Fragen der Ökonomie und läßt deutlich werden, daß die Zunahme der einzelnen Kreislauf- und Ventilationsgrößen zu einem endlichen Wert hin erfolgt.

$$I = \frac{K}{L} = \frac{\text{Betrag eines Parameters}}{\text{Hubleistung in Watt}}$$

$$= \text{spez. Kreislaufbelastung} \left[\frac{1}{\text{Watt}} \right]$$

$$= (L = G \times g \times v \times \sin \alpha \quad [\text{Watt}])$$

C. E r g e b n i s s e

I. Das Verhalten der Ventilations- und der Kreislaufgrößen bei Personen mit durchschnittlicher Leistungsbreite bei konstanter Schrittgeschwindigkeit und verschiedenen Neigungswinkeln.

Es gibt eine Vielzahl von spiroergometrischen Untersuchungsverfahren, die nach technischen und methodischen Gesichtspunkten eingeteilt werden können. In dieser Arbeit wurde das von REINDELL und KIRCHHOFF⁸⁾ entwickelte Untersuchungsverfahren angewandt, das den Gebrauch des Metabographen von A. FLEISCH mit einer fortlaufenden Pulsfrequenz- und Blutdruckbestimmung kombiniert.

Die mit dieser Methodik gefundenen Mittelwerte sind mit Angabe des jeweiligen Streubereichs für Ruhe und die einzelnen Belastungen, ausgedrückt durch die Größe des Anstellwinkels, in Tab. IV wiedergegeben.

1.) Sauerstoffaufnahme

In Abb. 4 sind die Mittelwerte der Sauerstoffaufnahme gegen die einzelnen Belastungsstufen graphisch aufgezeichnet.

Aus dem nahezu geradlinigen Anstieg der Mittelwertskurve ergibt sich eine lineare Beziehung der Sauerstoffaufnahme zur körperlichen Leistung. Der Verlauf dieser Kurve steht in guter Übereinstimmung zu den Befunden von TABAKIN, HANSEN, MERRIAM und CALDWELL⁴⁾. Zwar liegen die in vorliegender Arbeit gemessenen Sauerstoffaufnahmewerte deutlich höher, diese Abweichungen erklären sich jedoch aus der Art der Ergometerbelastung (verschiedene Geschwindigkeit) und der Art der verwendeten Meßapparatur.

Der Ruhewert beträgt durchschnittlich 300 ml und schwankt zwischen 210 und 390 ml. Beim horizontalen Gehen haben wir eine mittlere Sauerstoffaufnahme von 962 ml, d.h. schon bei dieser geringen Belastung wird ein Mehrverbrauch von durch-

Tab. IV Ventilations- und Kreislaufgrößen bei Personen durchschnittlicher Leistungsbreite
in Ruhe und während Belastung ($v = 4,5 \text{ km/h}$)

Steigung	O ₂ -Aufnahme ml/min STPD	CO ₂ -Abgabe ml/min STPD	RQ	AMV l/min STPD	Atem- äqui- valent	Herz- frequenz Schl/min	Sauer- stoff- puls in ml	Blutdruck syst. mm Hg	Blutdruck diast. mm Hg
Ruhe	300 ± 90	248 ± 105	0,83 ± 0,08	9,8 [±] 3,6	3,26 [±] 0,36	71 [±] 8	4,20 ± 1,50	122 ± 8	72 ± 6
0°	962 ± 115	756 ± 96	0,79 ± 0,07	21,6 [±] 2,8	2,24 [±] 0,28	97 [±] 9	9,90 ± 1,61	134 ± 14	68 ± 6
2°	1141 ± 110	952 ± 121	0,83 ± 0,05	24,4 [±] 3,7	2,14 [±] 0,20	101 [±] 9	11,30 ± 1,70	136 ± 13	69 ± 9
4°	1426 ± 150	1238 ± 142	0,87 ± 0,05	30,9 [±] 3,6	2,16 [±] 0,17	109 [±] 9	13,18 ± 1,62	145 ± 16	68 ± 9
6°	1755 ± 145	1544 ± 144	0,88 ± 0,05	40,7 [±] 6,9	2,28 [±] 0,25	122 [±] 8	14,52 ± 1,56	163 ± 18	72 ± 9
8°	2164 ± 185	1910 ± 190	0,88 ± 0,04	48,9 [±] 6,4	2,26 [±] 0,18	131 [±] 10	16,61 ± 1,64	170 ± 19	70 ± 10
10°	2634 ± 306	2411 ± 348	0,91 ± 0,06	66,2 [±] 10,0	2,63 [±] 0,41	155 [±] 13	17,56 ± 2,55	179 ± 17	71 ± 7
12°	3115 ± 324	3042 ± 406	0,97 ± 0,06	86,7 [±] 21,7	2,80 [±] 0,63	169 [±] 12	18,46 ± 2,92	191 ± 18	76 ± 9

schnittlich 662 ml festgestellt. Die Sauerstoffaufnahme steigt weiter an mit 1755 ml bei 6° Steigung und bei 12° beträgt sie 3115 ml. Dabei nimmt der Streubereich von Belastungsstufe zu Belastungsstufe zu, eine Erfahrung, die auch bei den übrigen Meßgrößen gemacht wird. Hier liegt der entscheidende Grund dafür, daß die Aussage einer einzigen Kreislaufgröße nicht mehr genügt, sondern die simultane Betrachtung aller Ventilations- und Kreislaufgrößen notwendig ist. Wesentlich tiefere Einblicke in die Regulationsvorgänge in den Kreislauffunktionen sind damit möglich geworden.

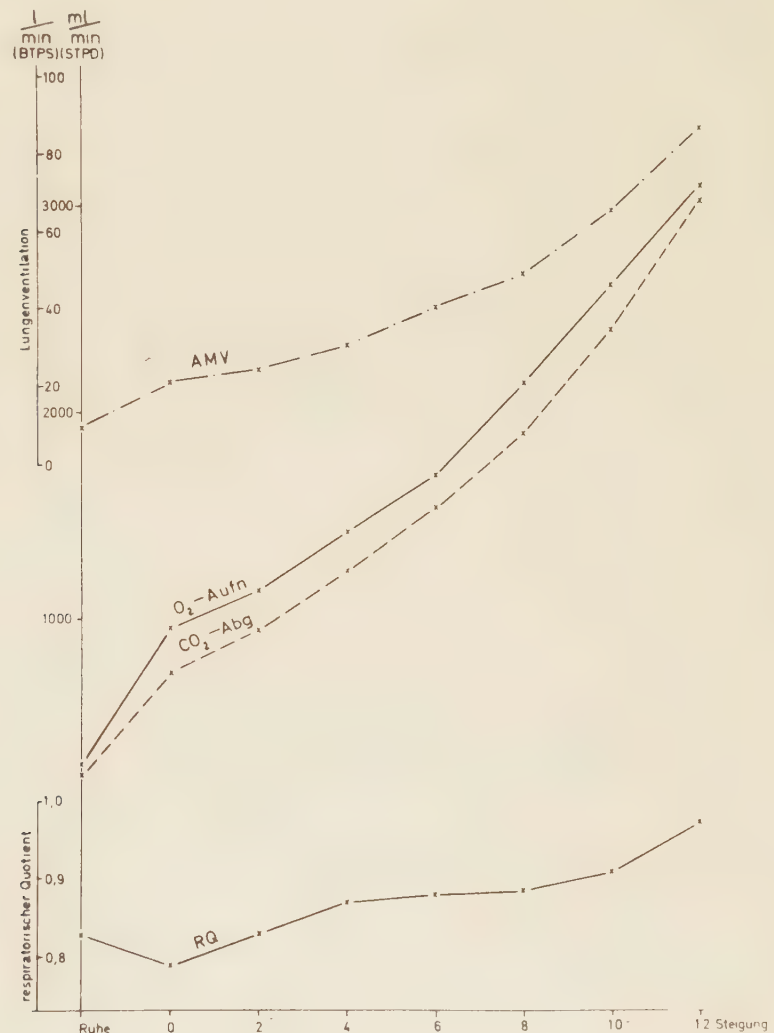


Abb. 4 Das Verhalten der Sauerstoffaufnahme, der Kohlensäureabgabe, des Atemminutenvolumens und des respiratori-

schen Quotienten bei Personen durchschnittlicher Leistungsbreite in Ruhe und während einer Belastung von 4,5 km/h Schrittgeschwindigkeit und verschiedenen Steigungen.

In Abb. 5 ist der Quotient aus Sauerstoffaufnahme und Belastung (in Watt), das ist die spezifische Kreislaufbelastung für die Sauerstoffaufnahme (I_{O_2}), für die einzelnen Steigungen aufgezeichnet. Zunächst zeigt die Kurve einen steilen Abfall, d.h. hier nimmt mit steigender Belastung die Sauerstoffaufnahme verhältnismäßig niedrig zu, was ein Kleinerwerden

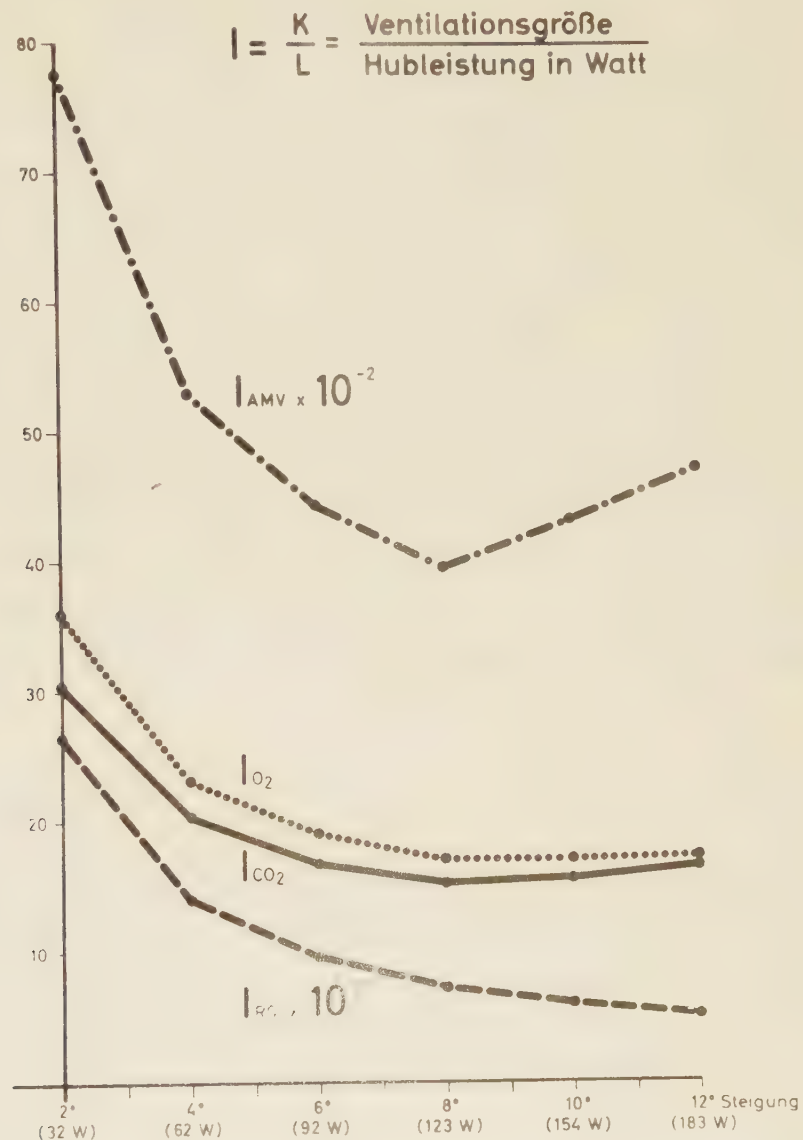


Abb. 5 Das Verhalten der Sauerstoffaufnahme, der Kohlensäureabgabe, des Atemminutenvolumens und respiratorischen Quotienten als spezifische Kreislaufbelastung I bei einer Schrittgeschwindigkeit von 4,5 km/n und verschiedenen Steigungen.

des Quotienten bedeutet. Bei Anstellen einer Steigung von 6° beginnt sich die Kurve abzuflachen und erreicht zwischen 8° und 10° entsprechend der Hubleistung von 123 bzw. 154 Watt ein Minimum. Hier erfolgt die Sauerstoffzunahme entsprechend der Belastungszunahme. Die optimale Ökonomie für den Sauerstoffverbrauch bei einem Körpergewicht von 72 kg und einer Schrittgeschwindigkeit von 4,5 k/h liegt demnach bei einer Belastung, bei der die Steigung 8° (10,5 %) beträgt, was einer theoretischen Hubleistung von 123 Watt entspricht. Bei einer weiteren Erhöhung der Wattzahl kann die entsprechende Sauerstoffaufnahme und die Abgabe des nun vermehrt anfallenden Kohlendioxyds nur durch eine außerordentlich starke Zunahme des Atemminutenvolumens erfolgen. Dabei steht die Zunahme der Ventilation von diesem Punkt an in einem schlechteren Verhältnis zur Wattzahl, was der Anstieg der spez. Kreislaufbelastung des Atemminutenvolumens zeigt (s. Abb.5). Durch Extrapolation der Sauerstoffkurve als spez. Kreislaufbelastung ist bei Steigungen über 12° ein leichter Anstieg der Parabel zu erwarten: Das Sauerstoffaufnahmevermögen erreicht sein Maximum. Unter Berücksichtigung der Sauerstoffschuld, wie sie bei solch hohen Belastungen zu erwarten ist, würde sich ein weit aus steilerer Anstieg ergeben, der Punkt der optimalen Ökonomie der Sauerstoffaufnahme wäre somit graphisch eindeutiger definiert.

2.) Kohlensäureabgabe

Das Verhalten der Kohlensäureabgabe in Ruhe und im Belastungsversuch ist in Abb. 4 dargestellt. Unter Ruhebedingungen liegt die Kohlensäureabgabe niedriger als die Sauerstoffaufnahme, es wurde ein Mittelwert von 248 ± 105 ml pro Minute ermittelt, der in guter Übereinstimmung mit den Befunden der oben angeführten Autoren steht. Unter Belastung steigt die Kohlensäureabgabe an, ein steady state wird 2 - 3 Minuten später als bei der Sauerstoffaufnahme erreicht, d.h., die Anlaufzeit ist länger und beträgt bis zu 7 Minuten. Bei einem Anstellwinkel von 6° beträgt die Kohlensäureabgabe 1544 ml/min mit einem Streu-

bereich von ± 144 . Bei 12° erreicht sie den Wert von 3042 ml/min und damit nahezu den Mittelwert der Sauerstoffaufnahme, was durch die zur Abszisse konvexe Krümmung der Mittelwertkurve zum Ausdruck kommt. Beruht diese Zunahme der Kohlensäureabgabe allein auf oxydativen Vorgängen, dann kann man das Erreichen der Leistungsgrenze als denjenigen Zeitpunkt definieren, wo die Kohlensäureabgabe und die Sauerstoffaufnahme sich die Waage halten. Selbstverständlich müssen hier Einflüsse wie Hyper- bzw. Hypoventilation und Verschiebung des Säure - Basen - Gleichgewichtes ausgeschlossen werden.

Abb. 5 zeigt, daß bei relativ niedrigen Belastungen die Zunahme der Kohlensäureabgabe prozentual geringer ist als die Zunahme der Wattzahl, es resultiert ein steiler Abfall der Kurve, jedoch etwas flacher als die analoge Kurve für die Sauerstoffaufnahme. Bei einer Wattzahl von 123 (8° Steigung) durchläuft sie ein Minimum, d.h., bei dieser Belastung ist die Kohlensäureproduktion des Organismus in Bezug auf die zu leistenden Arbeiten minimal. Erhöhen wir die Wattzahl über 123 auf 154 (10° Steigung) bzw. 183 (12° Steigung), so nimmt die Kohlensäureabgabe wieder verhältnismäßig stärker zu, die Kurve nähert sich immer mehr der analogen Parabel für die Sauerstoffaufnahme.

3.) Atemminutenvolumen

Das Atemminutenvolumen ist das Produkt aus dem Atemvolumen und der Atemfrequenz. Es umfaßt diejenige Luftmenge, die in einer Minute ventiliert wird. Die Mittelwerte, die im steady state bei Ruhe und während Belastung gemessen wurden, sind in Abb. 4 zur Darstellung gebracht. Auch hier zeigt sich eine stetige Zunahme proportional der Belastung, wobei die Mittelwertkurve geradlinig ansteigt. In Ruhe beträgt der Mittelwert 9,8 l mit einer mittleren Standardabweichung von $\pm 3,6$ l TABAKIN et al ⁴⁾ fanden einen Wert von $9,6 \pm 3,9$ l. Diese Werte haben auch im Vergleich zu den von REINDELL und KIRCH-

HOFF ⁵⁾ gefundenen Ruhewerten von $7,9 \pm 1,1$ l, eine relativ hohe Streubreite. Beim Übergang von Ruhe zum horizontalen Gehen kommt es zu einem schnellen Anstieg des Atemminutenvolumens auf einen Wert von $21,6 \pm 2,8$ l. Auf den niedrigen Belastungsstufen von 2° und 4° Steigung nimmt das Atemminutenvolumen relativ langsam zu, wobei sich schon nach 3 bis 4 min. ein konstanter Wert einstellt. Mit Zunahme der Belastung verlängert sich diese Einstellzeit bis auf 6-7 min. Die Ventilation beträgt bei 6° Steigung im Mittel $40,7$ l und steigert sich bis zu $86,7$ l bei einem Anstellwinkel von 12° (27 %), gleichzeitig wird eine stetige Vergrößerung des Streubereichs festgestellt.

Das Atemminutenvolumen als "spezifische Kreislaufbelastung" fällt zunächst stark ab (Abb. 5) und erreicht, wie schon unter 1.) beschrieben bei einer Wattzahl von 123 (8° Steigung) ein Minimum. Also wird bei dieser Belastung optimal ökonomisch ventiliert. Das Atemminutenvolumen beträgt an dieser Stelle im Mittel $48,9$ l mit einer Streubreite von $\pm 6,4$ l. Höhere Belastungen gehen mit einer verhältnismäßig stärkeren Zunahme der Ventilation einher, es kommt zu einem deutlichen Ansteigen der Kurve. Das Ansteigen ist eine Reaktion auf die nun vermehrt anfallende Kohlensäure und auf den Sauerstoffbedarf. Je flacher der Anstieg, desto ökonomischer ist die Atmung.

4.) Das Atemäquivalent

Durch die Bestimmung des Atemminutenvolumens unter Belastung ist eine Aussage über die absolute Förderleistung der Lungen möglich, nicht jedoch über die Atemökonomie. Dazu ist es notwendig, die entsprechenden Atemminutenvolumenwerte zur jeweiligen Sauerstoffaufnahme in Bezug zu setzen. Man erhält einen Verhältniswert, das Atemäquivalent, das aussagt, wieviel ml Luft ventiliert werden müssen, um 1 l Sauerstoff in der Zeiteinheit aufzunehmen. So deutet ein hoher Quotient auf ein relativ großes Atemminutenvolumen hin, während bei

einem niedrigeren Quotienten die gleiche Sauerstoffmenge mit einem geringeren Atemminutenvolumen, sozusagen mit einem geringeren Arbeitsaufwand, dem Organismus verschafft wird. In der Ruhe liegt das Atemäquivalent bei unseren Untersuchungen zwischen 2,90 und 3,62. Der Mittelwert beträgt 3,26. Unter Belastung sinkt der Mittelwert zunächst ab, d.h., die Atmung wird ökonomischer, auch wird die relativ große Streubreite deutlich eingeengt. Bei höheren Belastungen steigt der Quotient wieder an und erreicht bei einem Steigungswinkel von 12° einen Wert von $2,80 \pm 0,63$.



Abb. 6 Das Verhalten des Atemäquivalentes und der Streubreite bei Personen durchschnittlicher Leistungsbreite in Ruhe und während einer Belastung von 4,5 km/h Schrittgeschwindigkeit und versch. Steigungen.

5.) Der respiratorische Quotient

Der respiratorische Quotient stellt das Verhältnis der Kohlen-säureabgabe zur Sauerstoffaufnahme für eine bestimmte Zeit-einheit dar. Je nachdem, wie groß der Anteil der Hauptnah-rungsstoffe Fett, Kohlehydrate und Eiweiß bei den Oxydations-prozessen ist, schwankt er zwischen 0,7 und 1,0. Unter Grund-umsatzbedingungen beträgt der RQ etwa 0,82 - 0,84. Der Mittel-wert unter Ruheumsatzbedingungen beträgt bei unseren Versu-chen 0,83 und schwankt zwischen 0,75 und 0,91. Auf der ersten Belastungsstufe, dem horizontalen Gehen, verhielt sich der RQ bei den einzelnen Probanden unterschiedlich insofern als neben einem Absinken auch ein Ansteigen registriert wurde; im Mittel fiel er auf einen Wert von 0,79 ab (s. Abb. 4). Mit steigender Belastung steigt auch der RQ nahezu linear an bis zu einem Mittelwert von 0,97 bei einer Steigung von 12° . Ei-ne geringe Anzahl der Probanden erreichten bei dieser Be-lastungsstufe schon Werte von 1,0 und darüber. Sie hatten da-mit ihre Dauerleistungsgrenze erreicht bzw. überschritten, ein Fortsetzen wäre in diesem Fall mit einer wachsenden Sau-erstoffschuld verbunden.

6.) Der Blutdruck

In ähnlicher Weise, wie es für die Ventilationsgrößen beschrie-ben wurde, paßt sich auch der Blutdruck einer Belastungsstei-gerung an (s. Abb. 7). Entsprechend der Belastungshöhe stellt sich der systolische Blutdruck bei jedem Probanden auf einen charakteristischen Wert ein, der bei Fortführen der Arbeit konstant bleibt. Die Zeit, die der Einzelne benötigt, um ein solches steady state des Blutdrucks zu erreichen, ist indi-viduell verschieden lang. Sie wird als Anlaufzeit bezeichnet und reicht von 2 min. bis zu einer Zeitdauer von 6 min. Eine längere Anlaufzeit wurde insbesondere bei höheren Belastungen protokolliert. Die Mittelwerte des systolischen und diastoli-schen Blutdrucks und des arteriellen Mitteldrucks sind in Tab.

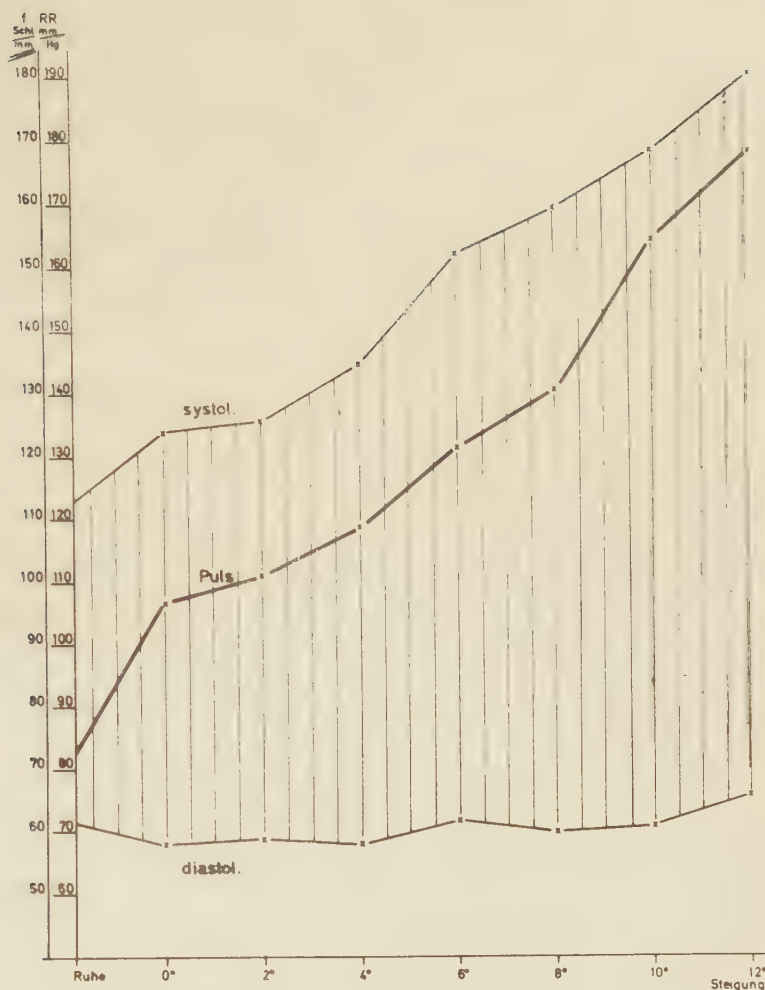


Abb. 7 Das Verhalten des Blutdrucks und der Pulsfrequenz bei Personen durchschnittlicher Leistungsbreite in Ruhe und während einer Belastung von 4,5 km/h Schrittgeschwindigkeit und verschiedenen Steigungen.

IV aufgezeichnet. In Ruhe wurde systolisch ein Mittelwert von 122 mm Hg errechnet, der sich beim Übergang zum horizontalen Gehen auf 134 mm Hg erhöhte. Der Druckanstieg je Belastungsstufe erfolgt nicht immer kontinuierlich, sondern es kommt nach einem geringen Anstieg in einer Belastungsstufe mitunter zu einem entsprechend höheren Druckanstieg in der darauffolgenden Belastungsstufe. Bei 21 % Steigung (12°) wird ein Mittelwert von 191 mm Hg gemessen.

Der diastolische Blutdruck verhält sich weniger einheitlich, während er bei Ruhe 72 mm Hg beträgt, finden wir beim Übergang zur Belastung teils einen geringen Anstieg, teils einen Abfall. Bei den meisten Probanden bleibt er abgesehen von geringfügigen Schwankungen konstant. Lediglich auf der höchsten Belastungsstufe

(Neigungswinkel von 12°) ist mit 76 mm Hg ein mäßiger Anstieg zu verzeichnen.

7.) Die Pulsfrequenz

In Ruhe beträgt der Mittelwert der Pulsfrequenz 71 Schl/min bei einer Streubreite von ± 8 Schlägen. Nach schnellem Anstieg bei Arbeitsbeginn wird nach wenigen Minuten ein steady state der Pulsfrequenz erreicht. Dieser allmähliche Übergang in den steady state-Wert wird bei den Steigungen von 10° und 12° d.h. bei den hohen Belastungsstufen in der Regel 2 - 3 min später erreicht als bei niedrigeren Belastungen. Nach jeder Erhöhung der Belastung erfolgt auch eine Zunahme der Pulsrate, was in den ermittelten steady state-Werten deutlich zum Ausdruck kommt (s. Tab. IV). So nimmt die Pulsrate bei Änderung der Steigung von 2° (3,5 %) auf 6° (10,5 %) um 21 Schl/min zu (von 101 auf 122 Schl/min). Eine Anstiegsänderung von 8° (14 %) auf 12° (21 %) bewirkt schon eine Zunahme um nahezu das Doppelte (von 131 auf 169 Schl/min). Die Einzelergebnisse sind auf den höheren Belastungsstufen weitaus unregelmäßiger verteilt, als auf den niedrigeren.

8.) Der Sauerstoffpuls

Setzt man die Sauerstoffaufnahme und die Pulsfrequenz in Ruhe und bei den verschiedenen Belastungen zueinander in Beziehung, so erhält man den sog. Sauerstoffpuls, oft auch als Sauerstoffäquivalent bezeichnet (s. Abb. 8). Dieser Sauerstoffpuls stellt diejenige Sauerstoffmenge in ml dar, die pro Pulsschlag aufgenommen wird. Mit Hilfe dieses Quotienten sind wichtige Aussagen über die Sauerstofftransportleistung möglich, außerdem ist diese Größe ein Maßstab für die ökonomische Regulation des Kreislaufes und damit zur Beurteilung der Leistungsbreite der Versuchspersonen. In Ruhe wurde ein Mittelwert von 4,2 ermittelt, der beim Übergang zum horizontalen Gehen auf einen Wert von 9,9 anstieg. Es folgt eine relativ gleichmäßige Zunahme mit der Vergrößerung des Steigungswinkels, wobei bei einer Be-

lastungsänderung von 6° auf 8° mit 2,09 die größte Änderung erreicht wird (s. Tab. IV). In der höchsten Belastungsstufe unserer MeBreihe wurde ein Mittelwert von $18,46 \pm 2,92$ gefunden.

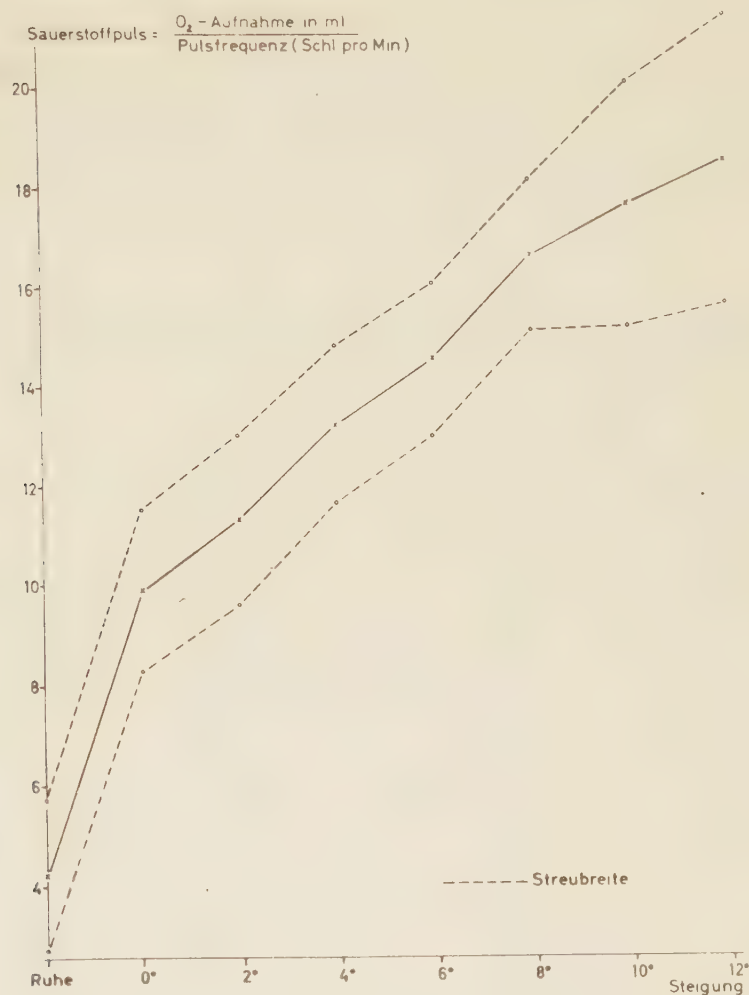


Abb. 8 Das Verhalten des Sauerstoffpulses und der Streubreite bei Personen durchschnittlicher Leistungsbreite in Ruhe und während einer Belastung von 4,5 km/h Schrittgeschwindigkeit und verschiedenen Steigungen.

II. Das Verhalten der Ventilations- und Kreislaufgrößen bei verschiedenen Schrittgeschwindigkeiten und Neigungswinkeln

Diese Versuche wurden an drei Personen vorgenommen, deren Körpergewichte 64, 75 und 88 kg betrugen. Abb. 9 a und b zeigt die Abhängigkeit der Sauerstoffaufnahme und Kohlensäureabgabe von der Schrittgeschwindigkeit und dem Körpergewicht bei den einzelnen Steigungen. Ein Vergleich der beim horizontalen Gehen bei Geschwindigkeiten von 7,5 km/h und 10,5 km/h erhaltenen drei Sauerstoffaufnahmewerte miteinander ergibt Differenzen von 463 - 474 - 634 ml, wobei der höchste Differenzbetrag zu der Person mit dem höchsten Körpergewicht gehört (s. Tab. V). Beim Über-

Tab. V Die Sauerstoffaufnahmewerte (ml/min) bei den einzelnen Schrittgeschwindigkeiten und Steigungen.

Belastung	J.B. 64 kg	W.D. 75 kg	H.B. 88 kg
Ruhe	348	280	350
4,5 km /h 6°	1626	1805	2274
8°	1976	2222	2466
10°	2172	2464	3154
12°	2648	3156	----
7,5 km /h 0°	1137	1246	1493
2°	1346	1680	1952
4°	1780	2062	2508
6°	2270	2644	3136
8°	2808	3304	----
10°	3090	3834	----
10,5 km /h 0°	1600	1720	2127
2°	2022	2368	2860
4°	2414	2728	3492
6°	3420	4346	----

gang vom horizontalen Gehen zum Gehen bei 2° (3,5 %) Steigung erfolgt eine Sauerstoffaufnahmeerhöhung, die bei der höheren Geschwindigkeit von 10,5 km/h nahezu doppelt so groß ist, wie

bei 7,5 km/h. Dies gilt besonders für den leichtgewichtigen Probanden J.B. (64 kg). Bei W.D. (75 kg) verhalten sich die Sauerstoffzunahmen wie 4 : 6 und bei H.B. (88 kg) nur noch wie 5 : 7.

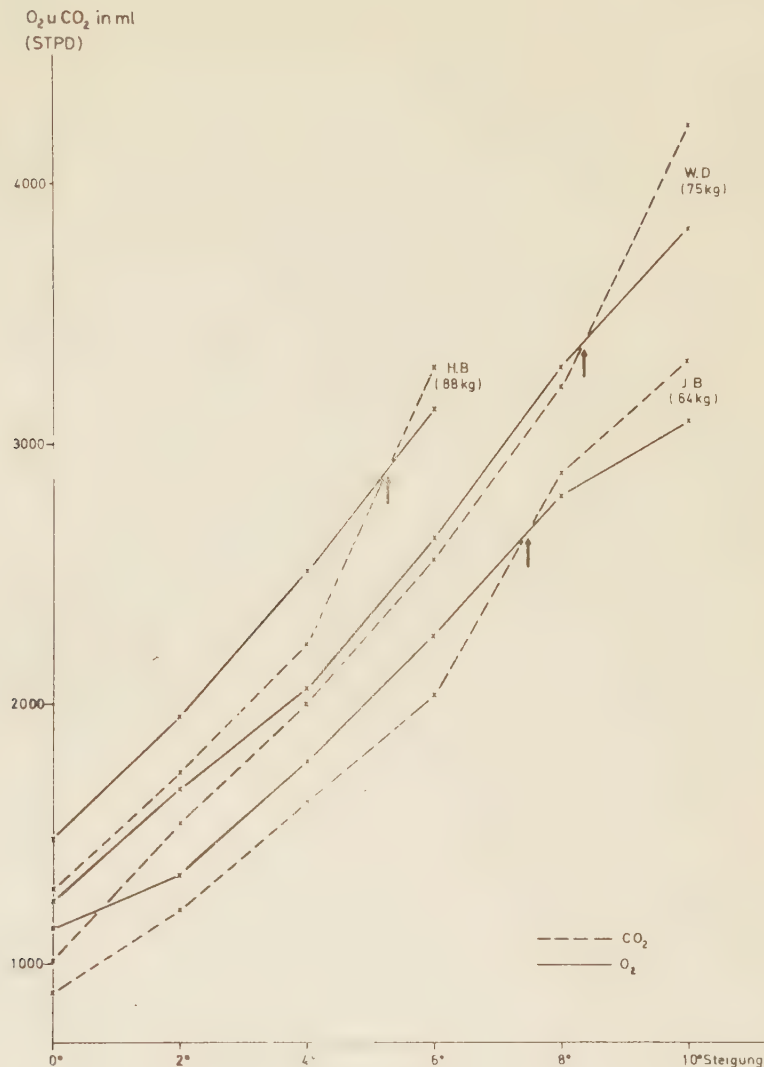


Abb. 9 a Das Verhalten der Sauerstoffaufnahme und der Kohlensäureabgabe bei einer Schrittgeschwindigkeit von 7,5 km/h und verschiedenen Steigungen ($N = 3$).

Wird der Neigungswinkel auf 4° (7 %) erhöht, so kommt es bei den genannten Schrittgeschwindigkeiten zu einer Sauerstoffaufnahmeerhöhung um einen nahezu gleichgroßen Betrag; die Verhältnisswerte sind 4:4, 4:4 und 5,5:6. Die Pfeile ↑ in Abb. 9

zeigen den Zeitpunkt an, bei dem Sauerstoffaufnahme und Kohlen-
säureabgabe den gleichen Betrag erreichen. Hier ist der $RQ = 1$
und damit die Dauerleistungsgrenze erreicht (KIRCHHOFF u. REINDELL
6)).

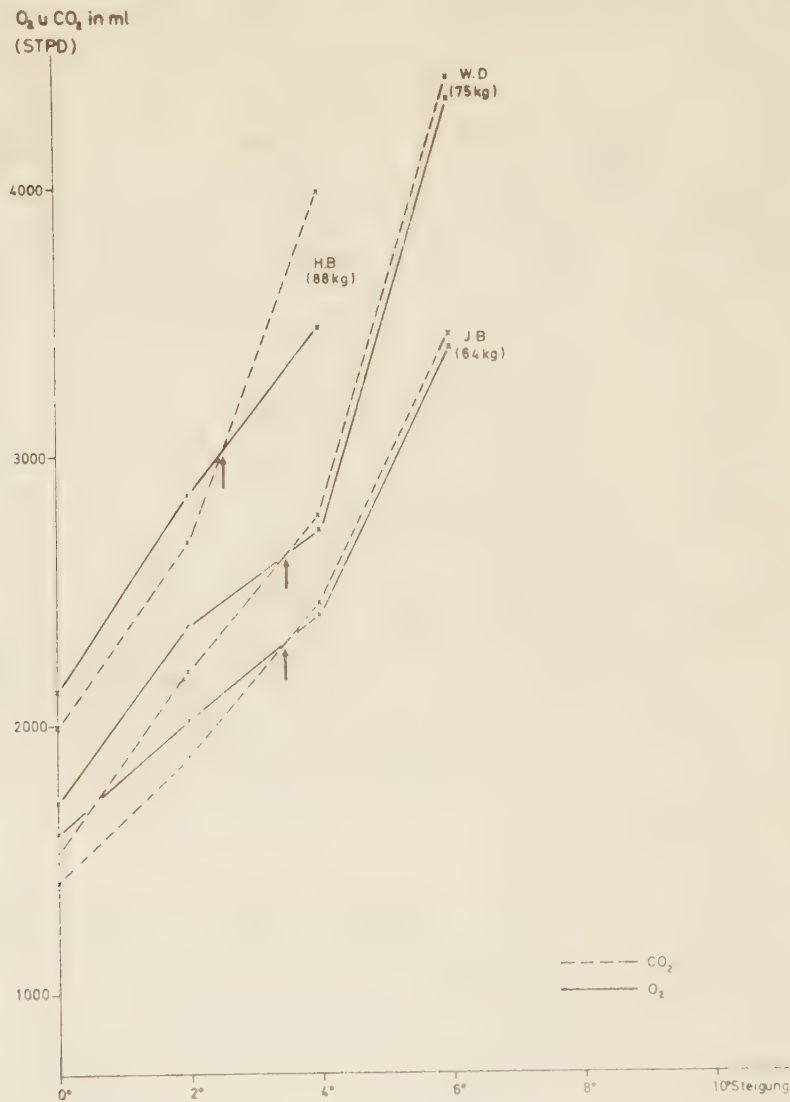


Abb. 9 b Das Verhalten der Sauerstoffaufnahme und der Kohlen-
säureabgabe bei einer Schrittgeschwindigkeit von
10,5 km/h und verschiedenen Steigungen ($N = 3$)

Die Übersicht in Tab. VI läßt erkennen, daß die Dauerleistungs-
grenze bei einer hohen Geschwindigkeit schon mit einer kleineren
Steigung erreicht wird. Außerdem fällt auf, daß zu diesem Zeit-
punkt die Sauerstoffaufnahme wesentlich geringer ist als an der
Dauerleistungsgrenze bei einer niedrigeren Geschwindigkeit. Also

muß die Kohlensäureproduktion bei einer Schrittgeschwindigkeit von 7,5 km/h bzw. 10,5 km/h prozentual schneller ansteigen als bei 4,5 km/h.

Tab. VI Die Sauerstoffaufnahme (in ml/min), die an der Dauerleistungsgrenze bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Steigungen von den drei Versuchspersonen erreicht werden.

Versuchspersonen	Belastung	Sauerstoffaufnahme	Dauerleistungsgrenze
J.E. (64 kg)	4,5 km/h 12°	2648	nicht erreicht
	7,5 km/h 8°	2808	erreicht
	10,5 km/h 4°	2414	erreicht
W.D. (75 kg)	4,5 km/h 12°	3156	nicht erreicht
	7,5 km/h 8°	3304	erreicht
	10,5 km/h 4°	2728	erreicht
H.B. (88 kg)	4,5 km/h 10°	3154	erreicht
	7,5 km/h 6°	3136	erreicht
	10,5 km/h 4°	2414	erreicht

Der respiratorische Quotient steigt bei einer höheren Schrittgeschwindigkeit wesentlich rascher an. Beim Übergang von Ruhe zum horizontalen Gehen kommt es bei 10,5 km/h in keinem Fall zu einem Abfall des RQ, wie es bei den Untersuchungen bei konstanter Geschwindigkeit von 4,5 km/h beobachtet wurde (s. Abb.4). Mit dem Erhöhen der Schrittgeschwindigkeit erfolgt auch ein Anstieg des Atemminutenvolumens. Dieser Anstieg ist umso deutlicher, je höher das Körpergewicht der Versuchsperson (s. Abb. 10 a u. b). Beim Übergang von der Ruhe zum horizontalen Gehen stellt sich das Atemminutenvolumen der übergewichtigen Versuchsperson auf einen prozentual wesentlich höheren Wert ein im Vergleich zu den Probanden mit geringerem Körpergewicht (s. Tab. VII). Mit dem Übergang vom horizontalen Gehen zum Gehen bei einer Steigung von 2° erfolgt eine Zunahme der Ventilation. Die Ge-

Tab. VII Das Atemminutenvolumen (in Liter) bei horizontalem Gehen mit verschiedenen Schrittgeschwindigkeiten.

Geschwindigkeit	J.B. 64 kg	W.D. 75 kg	H.B. 88 kg
Ruhe	6,9	8,0	9,3
4,5 km/h	14,5	21,8	33,4
7,5 km/h	20,0	25,0	38,0
10,5 km/h	25,0	35,5	53,3



Abb. 10 a Das Verhalten des Atemminutenvolumens bei einer Schrittgeschwindigkeit von 7,5 km/h und verschiedenen Steigungen (N = 3).

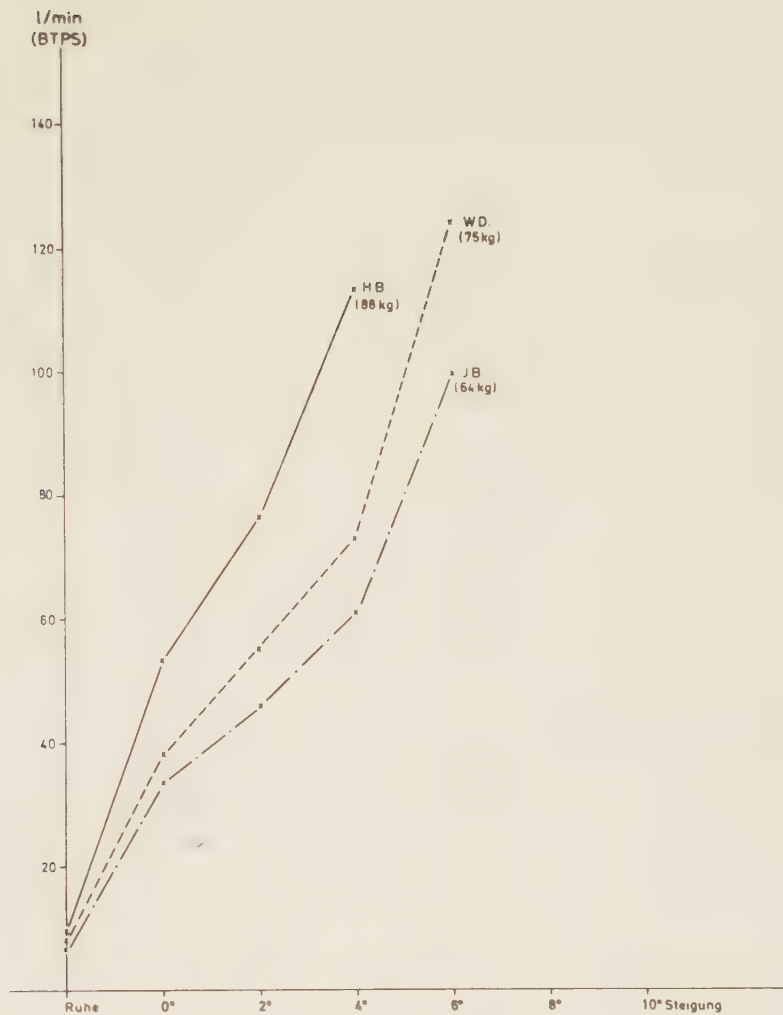


Abb. 10 b Das Verhalten des Atemminutenvolumens bei einer Schrittgeschwindigkeit von 10,5 km/h und verschiedenen Steigungen (N = 3).

geschwindigkeit des Laufbandes beeinflusst diese Zunahme entscheidend. Während bei einer niedrigeren Geschwindigkeit von 4,5 km/h mit der Erhöhung des Neigungswinkels eine relativ geringe Zunahme des Atemminutenvolumens einhergeht, erreicht sie bei 10,5 km/h schon bei einer Steigung von 4° (7 %) Werte, die um 39 l (J.B.), 42,2 l (W.D.) und 66,8 l (H.B.) höher liegen als die Werte bei der gleichen Steigung, aber einer Schrittgeschwindigkeit von nur 4,5 km/h (s. Tab. VIII).

Tab. VIII Die Atemminutenvolumina bei den einzelnen Geschwindigkeiten und Steigungen.

Belastung	J.B. 64 kg	W.D. 75 kg	H.B. 88 kg
Ruhe	6,9	8,0	9,3
4,5 km/h 4°	22,0	31,0	47,0
6°	33,3	36,0	54,6
8°	40,1	45,2	58,4
10°	48,8	52,0	80,0
12°	<u>60,4</u>	<u>74,8</u>	--
7,5 km/h 0°	21,8	25,0	35,5
2°	28,6	35,0	41,4
4°	39,0	46,4	59,0
6°	50,0	61,4	<u>86,2</u>
8°	<u>70,0</u>	<u>81,0</u>	--
10°	86,2	114,3	--
10,5 km/h 0°	33,4	38,0	53,3
2°	46,0	55,4	76,6
4°	<u>61,0</u>	<u>73,2</u>	<u>113,8</u>
6°	99,9	124,4	--

In obenstehender Tabelle sind die Atemminutenvolumenwerte, die an der Dauerleistungsgrenze bei den einzelnen Geschwindigkeiten und Steigungen erreicht werden, unterstrichen.

Das Atemäquivalent nimmt beim Übergang Ruhe - horizontales Gehen bei 7,5 km/h wie bei 10,5 km/h Schrittgeschwindigkeit zunächst ab, d.h. der Übergang zu dieser Belastung geht mit einem Ökonomiegewinn der Atmung einher. Lediglich J.B., der in Ruhe mit 1,98 den geringsten Atemäquivalentwert aufweist, macht eine Ausnahme: Bei 10,5 km/h kommt es zu einem Anstieg auf 2,09, ein Wert, der jedoch noch deutlich unter den Werten von W.D. (2,21) und H.B. (2,50) liegt.

Tab. IX Das Atemäquivalent bei den einzelnen Geschwindigkeiten und Steigungen.

Belastung	J.B. 64 kg	W.D. 75 kg	H.B. 88 kg
Ruhe	1,98	2,85	2,66
4,5 km/h 6°	2,06	2,00	2,40
8°	2,03	2,03	2,36
10°	2,25	2,11	<u>2,53</u>
12°	<u>2,28</u>	<u>2,37</u>	--
7,5 km/h 0°	1,92	2,00	2,38
2°	2,12	2,08	2,12
4°	2,19	2,24	2,35
6°	2,20	2,32	2,71
8°	<u>2,49</u>	<u>2,45</u>	--
10°	2,78	2,99	--
10,5 km/h 0°	2,09	2,21	2,50
2°	2,27	2,34	2,68
4°	<u>2,53</u>	<u>2,68</u>	<u>3,26</u>
6°	2,92	2,87	--

Mit dem Erhöhen des Neigungswinkels steigt der Wert für das Atemäquivalent wieder an und zwar umso deutlicher, je höher die Schrittgeschwindigkeit. In Tab. IX sind die Äquivalentwerte an der Dauerleistungsgrenze unterstrichen: bei der niedrigsten Schrittgeschwindigkeit (4,5 km/h) werden Werte von 2,28 (J.B. 64 kg) 2,37 (W.D. 75 kg) und 2,53 (H.B. 88 kg) errechnet, die deutlich niedriger sind als die entsprechenden Werte bei 7,5 km/h und 10,5 km/h. Also wird bei 4,5 km/h wesentlich ökonomischer geatmet, d.h. bei dieser Schrittgeschwindigkeit können somit die höheren Steigungen von 12° (21 %) bzw. 10° (17 %) auf die Dauer bewältigt werden.

In Ruhe werden folgende Blutdruckwerte gemessen: J.B. 115/70, W.D. 110/70 und H.B. 105/70 mm Hg. Beim Übergang zum horizontalen Gehen steigt der systolische Blutdruck an, der diastolische fällt um 10 mm Hg ab (s. Tab. X), d.h. die Blutdruckamplitude nimmt zu, und zwar erfolgt bei einer Schrittgeschwindigkeit von 10,5 km/h ein höherer Anstieg als bei 7,5 km/h. Mit der Vergrößerung des Anstellwinkels steigen auch die systolischen Blutdruckwerte an (s. Abb. 11 a und b).

Der diastolische Blutdruck verhält sich unterschiedlich, steigt jedoch in keinem Fall über seinen Ruhewert an.



Abb. 11 a Das Verhalten des systolischen Blutdrucks bei einer Schrittgeschwindigkeit von 7,5 km/h und verschiedenen Steigungen (N = 3).



Abb. 11 b Das Verhalten des systolischen Blutdrucks bei einer Schrittgeschwindigkeit von 10,5 km/h und verschiedenen Steigungen (N = 3).

Die Pulsfrequenz der drei Personen beträgt in Ruhe 80 (J.B.), 65 (W.D.) und 85 (H.B.) Schl/min. Sie erhöht sich beim Übergang zum horizontalen Gehen bei 4,5 km/h auf 113 (J.B.), 90 (W.D.) und 110 (H.B.) Schl/min. Die entsprechenden Werte waren 110, 110 und 120 Schl/min bei 7,5 km/h und 125, 120 und 140 Schl/min bei 10,5 km/h. Bis zu einem Neigungswinkel von 2° ist der Anstieg der Pulsfrequenz für die Geschwindigkeiten von 7,5 km/h und 10,5 km/h relativ flach, um bei höheren Steigungsgraden deutlicher zu werden. Bei 4,5 km/h verläuft der relativ flache Anstieg bis zu einer Steigung von 8°, ausgenommen H.B. (88 kg), dessen Pulsfrequenz schon bei 6° in einen steileren Abschnitt übergeht (s. Abb. 12 a und b).



Abb. 12 a Das Verhalten der Pulsfrequenz bei einer Schrittgeschwindigkeit von 7,5 km/h und verschiedenen Steigungen (N = 3).

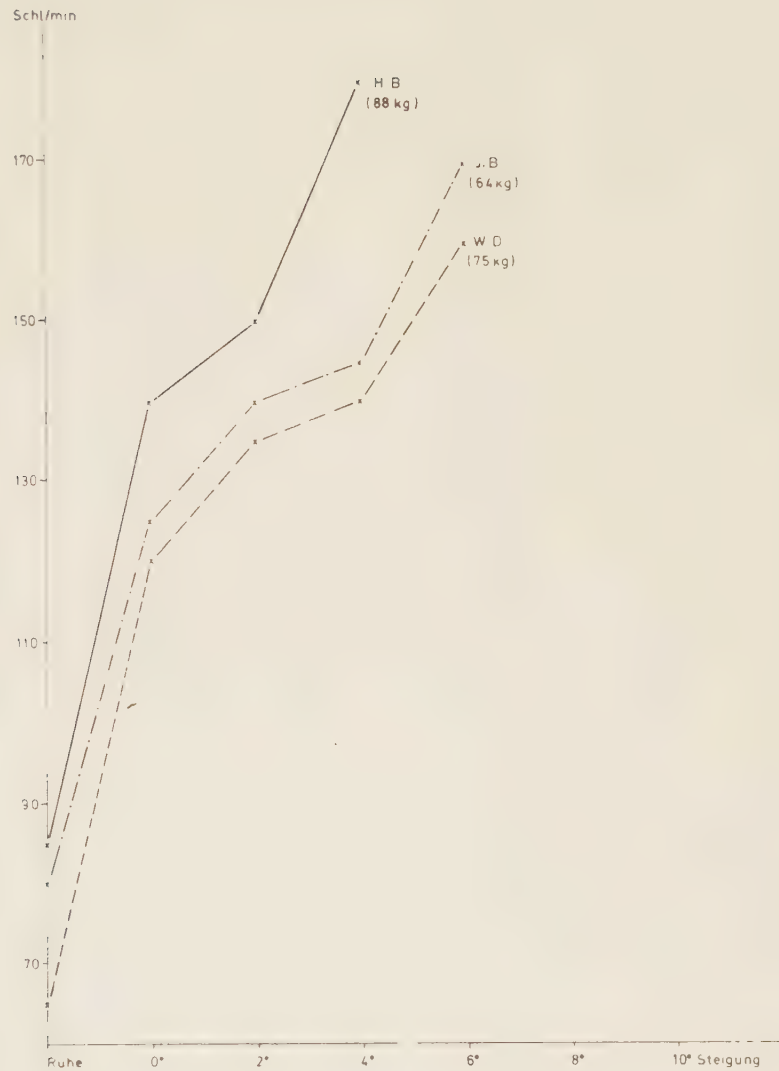


Abb. 12 b Das Verhalten der Pulsfrequenz bei einer Schrittgeschwindigkeit von 10,5 km/h und verschiedenen Steigungen (N = 3).

Tab. X Blutdruck (mm Hg) und Pulsfrequenz (Schl/min) bei den einzelnen Geschwindigkeiten und Steigungen

Belastung		J.B. (64 kg)		W.D. (75 kg)		H.B. (88 kg)	
		RR	Puls	RR	Puls	RR	Puls
Ruhe		115/70	80	110/70	65	105/70	85
4,5 km/h	6°	145/65	130	140/50	120	145/65	140
	8°	145/60	145	160/60	125	150/60	150
	10°	160/60	150	170/70	135	170/55	165
	12°	165/60	160	180/60	150	----	---
7,5 km/h	0°	120/60	110	125/60	110	120/60	120
	2°	140/60	120	135/60	115	130/60	125
	4°	145/60	130	160/60	125	150/65	170
	6°	150/60	150	200/70	140	170/60	185
	8°	170/70	160	210/65	145	----	---
	10°	195/55	170	210/55	150	----	---
10,5 km/h	0°	130/60	125	135/60	120	150/60	140
	2°	145/60	140	170/60	135	160/60	150
	4°	155/60	145	180/60	140	180/60	180
	6°	175/60	170	220/60	160	----	---

Der Sauerstoffpuls verhält sich bei den drei Versuchspersonen beim horizontalen Gehen so, daß eine Zunahme desselben mit der Erhöhung der Schrittgeschwindigkeit erfolgt. Auch zeigt sich bei diesen niedrigsten Belastungsstufen eine Abhängigkeit vom Gewicht: Der Proband mit dem höchsten Gewicht erreicht den höchsten Sauerstoffpuls. Aus Tab. XI ist ersichtlich, daß bei Einstellung der einzelnen Steigungen der Betrag des Sauerstoffpulses kontinuierlich ansteigt. Die an der Dauerleistungsgrenze erreichten Sauerstoffpulse sind in obiger Tabelle unterstrichen. Bei einer Schrittgeschwindigkeit von 4,5 km/h erhalten wir für J.B. (64 kg) einen Wert von 16,60, für W.D. (75 kg) einen Wert von 21,0 bei jeweils 12° Steigung und für H.B. (88 kg) einen Wert von 19,90 bei 10° Steigung. Wird die Schrittgeschwindigkeit auf 7,5 km/h bzw. 10,5 km/h erhöht, so werden an der Dauerleistungsgrenze wieder die bei 4,5 km/h be-

schriebenen Steigungen, noch die dazugehörenden Sauerstoffpulswerte erreicht.

Die bei einer Schrittgeschwindigkeit von 10,5 km/h und einer Steigung von 6° aufgezeichneten Sauerstoffpulse von 20,1 bzw. 27,1 sind nicht zu verwerfen, da die Dauerleistungsgrenze schon überschritten ist und somit eine Sauerstoffschuld eingegangen wird, die bei der Errechnung der Sauerstoffwerte nicht berücksichtigt ist.

Tab. XI Die Sauerstoffpulswerte bei den einzelnen Geschwindigkeiten und Steigungen

Belastung		J.B. (64 kg)	W.D. (75 kg)	H.B. (88 kg)
Ruhe		4,35	4,30	4,12
4,5 km/h	6°	12,50	15,04	16,23
	8°	13,60	17,80	16,50
	10°	14,46	18,28	<u>19,90</u>
	12°	<u>16,60</u>	<u>21,00</u>	---
7,5 km/h	0°	10,32	11,32	12,44
	2°	11,21	14,60	15,61
	4°	13,70	16,50	14,75
	6°	15,13	18,90	<u>16,95</u>
	8°	<u>17,56</u>	<u>22,80</u>	---
	10°	20,00	25,50	---
10,5 km/h	0°	12,80	14,34	15,20
	2°	14,50	17,50	19,05
	4°	<u>16,64</u>	<u>19,50</u>	19,40
	6°	20,10	27,10	---

III. Vita maxima-Untersuchungen am Laufband

In ähnlicher Form wie bei der steady state-Belastung wurden auch für die vita maxima-Belastung entsprechende Einzel- und Mittelwerte errechnet. Die Untersuchungsergebnisse der vita maxima-Belastung bei einer Schrittgeschwindigkeit von 6 km/h und minütlich ansteigendem Neigungswinkel von 6 - 15° sind in Tab. XII aufgeführt. Auch aus dieser Tabelle geht hervor, daß alle gemessenen Parameter mit ansteigendem Neigungswinkel stetig höhere Werte einnehmen und auf den höchsten Belastungsstufen die Zuwachsräte besonders groß ist. Bei Registrierung der einzelnen Ventilationswerte fallen relativ hohe Werte für Sauerstoffaufnahme, Atemminutenvolumen und Pulsfrequenz auf. So wurden bei einem Neigungswinkel von 15° (27 %) durchschnittlich 3700 ml Sauerstoff verbraucht, der entsprechende Höchstwert für das Atemminutenvolumen liegt bei 105 l, für die Pulsfrequenz bei 200 Schlägen pro Minute. Einige Versuchspersonen gaben an, noch eine höhere Belastungsstufe ableisten zu können, dazu waren aber die entsprechenden technischen Möglichkeiten an dem verwandten Laufbandgerät nicht gegeben.

Aus diesen Untersuchungen läßt sich eindeutig belegen, daß mit dieser Arbeitsform eine besonders intensive Ausbelastung des Prüflings möglich ist. Die Einzelwerte für die maximale Sauerstoffaufnahme - der wichtigsten die Leistungsfähigkeit bestimmenden Untersuchungsgröße - schienen höher als die üblicherweise bei Fahrradergometer- bzw. Drehkurbelergometerarbeit ermittelten zu liegen. Diese Feststellung war der Anlaß, eine vergleichende Belastung bei Fahrradergometerarbeit in sitzender Stellung durchzuführen, zumal über derartige Vergleiche auch in der Literatur unterschiedliche Ergebnisse vorliegen.

So liegt nach ASTRAND die maximale Sauerstoffaufnahme bei Fahrradergometerarbeit in annähernd gleicher Höhe wie bei Laufbandarbeit, während WILLIAMS eine höhere Sauerstoffaufnahme bei Laufbandergometerarbeit gegenüber der Fahrradergometerarbeit nachweisen konnte.

Tab. XII Verhalten der Ventilations- und Kreislaufgrößen bei vita maxima-Belastung am Laufband
(Geschwindigkeit 6 km/h)
(Mittelwerte bei 20 Normalpersonen)

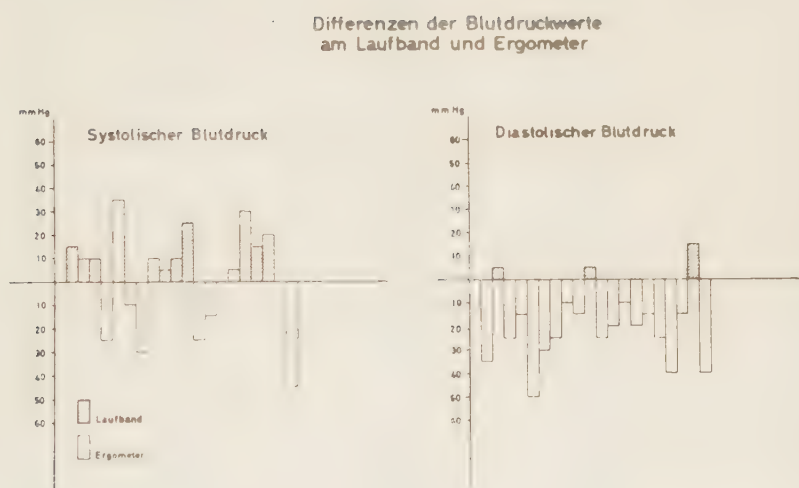
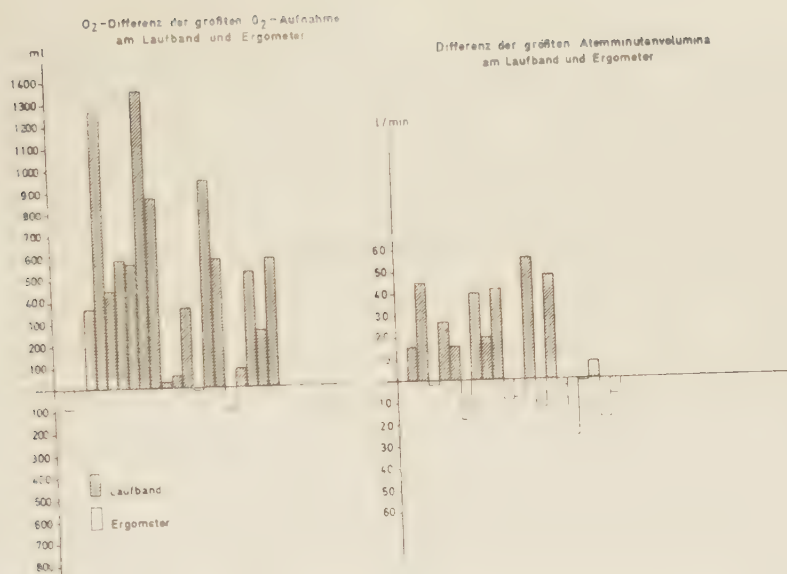
Neigungswinkel	Ruhe	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	15°
O ₂ -Aufnahme in ml/min STPD	310	1945	2420	2670	2700	2810	3050	3240	3460	3110	3700
AMV in l/min BTPS	12	33	43	50	58	65	73	83	93	108	105
Herzfrequenz Schl/min	74	131	134	141	148	155	164	171	177	184	200
Blutdruck, systol. mm Hg	128	166	176	181	184	195	201	205	206	207	211
Blutdruck, diastol. mm Hg	71	63	64	61	57	58	54	53	53	51	47

IV. Vergleichende Untersuchungen über die maximale Leistungsfähigkeit bei Laufband- und Ergometerarbeit

20 Probanden wurden einer vergleichenden Belastung am Laufband- und Fahrradergometer unterzogen. Die Belastung am Ergometer erfolgte bei einer Anfangsbelastung von 75 Watt bei minütlicher Zunahme der Wattzahl um 25 Watt. Die Umdrehungszahl am Ergometer betrug 60 Umdrehungen/min. Bei dieser Belastungsform wurden durchschnittlich 225 - 275 Watt bei Arbeitszeiten von 7 - 9 Minuten erreicht. Da eine vergleichende Betrachtung der Parameter bei einer bestimmten Wattleistung nicht möglich ist, wurden die entsprechenden maximalen Werte beider Versuche verglichen. Für jede Versuchsperson wurde schließlich die Differenz der max. Werte bei jedem Parameter gebildet und zwar Fahrradergometerwert subtrahiert von dem Laufbandwert. Die Tabelle zeigt die Mittelwerte der maximal gemessenen Kreislauf- und Ventilationsgrößen bei gleichzeitiger Angabe der Streubreite und der Statistischen Signifikanz. In Abb. 13 und 14 sind außerdem die Abweichungen der wichtigsten Ventilations- und Kreislaufparameter graphisch dargestellt, um das Verhalten im Einzelfall aufzuzeigen.

Tab. XIII Mittelwerte der maximal erreichten Ventilations- und Kreislaufgrößen bei vita maxima-Belastung am Laufband- und Fahrradergometer bei 20 Probanden.

	Laufband- ergometer		Fahrrad- ergometer		Signi- fikanz	
	Mittel	Streu- bereich	Mittel	Streu- bereich	t	%
<u>O₂-Aufnahme in ml/min</u>	3807	350	3334	444	3.33	99
Resp. Quotient	1.04	0.06	1.08	0.11	2.10	95
Atemmin.volumen l/min	109	26	102	21	2.15	95
Atemäquivalent	3.02	0.64	3.05	0.42	0.17	-
Pulsfrequenz Schl/min	187	9	174	18	2.09	95
Blutdruck, syst. mm Hg	218	27	211	24	1.54	-
Blutdruck, diast. mm Hg	52	15	73	16	5.53	99.9
Sauerstoffpuls	20.8	3.6	19.2	2.5	2.25	95



Aus den Abbildungen und Tabellen geht hervor, daß fast in allen Untersuchungen eine deutlich vermehrte O_2 -Aufnahme am Laufband besteht, die z.T. mehr als 1000 ml beträgt. Nur in 3 Fällen wurde am Fahrradergometer eine größere O_2 -Aufnahme ermittelt, die jedoch 100 ml nicht überschritt (Abb. 13). (Statist. Sicherung siehe Tab. XIII). Bei dem größeren Teil der Probanden überwiegen die maximal erreichten AMV-Werte ebenfalls während der Laufbandbelastung (Abb. 13). Die maximal erreichten Herzfrequenzen (s. Tab. XIII) streuen bei der Fahrradergometerbelastung wesentlich stärker (von 133 bis 196 Schl/min) und sind im Durchschnitt 13 Schl/min am Laufband höher (Stat. Signifikanz 95 %).

Tab. XIV

Nr.	max. Sauerstoffaufnahme in ml Laufb.-Fahrrad = m. O_2 -Diff.	max. Herzfrequenz Schl/min Laufb.-Fahrrad. = m. HF-Diff.
1	4020 - 4110 = - 90	186 - 186 = + 0
2	3360 - 3360 = + 0	193 - 190 = + 3
3	3650 - 3280 = + 370	190 - 188 = + 2
4 x	3650 - 3180 = + 1280	135 - 161 = - 26
5	3550 - 2990 = + 560	175 - 135 = + 40
6	4050 - 2960 = + 1090	191 - 133 = + 58
7	3450 - 2540 = + 920	195 - 174 = + 21
8	4000 - 2640 = + 1360	193 - 150 = + 43
9	4170 - 3300 = + 870	193 - 178 = + 15
10	3850 - 3820 = + 30	190 - 180 = + 10
11	3830 - 3770 = + 60	170 - 169 = + 1
12	3740 - 3210 = + 530	176 - 175 = + 1
13	3300 - 3170 = + 130	190 - 194 = - 4
14	4150 - 3200 = + 950	189 - 160 = + 29
15	3520 - 2930 = + 590	195 - 186 = + 9
16	3520 - 3620 = - 100	189 - 182 = + 7
17	3570 - 3480 = + 90	179 - 189 = - 10
18	3540 - 3090 = + 450	190 - 178 = + 12
19 xx	4520 - 4430 = + 90	170 - 187 = - 17
20	3910 - 3320 = + 590	196 - 186 = + 10

x Versuch 4 wird nicht berücksichtigt, da HF-Bestimmung fehlerhaft.

xx Leistungssportler (Wildwassersportler u. Bergsteiger), der bei der angewendeten Laufbandbelastung nicht ausbelastet war.

Das Verhalten der maximal erreichten systolischen Blutdruckwerte zeigt in der Mittelwertsbetrachtung keine statistisch signifikanten Veränderungen. Bei Betrachtung der Einzelfälle fällt jedoch eine deutliche Differenz der systolischen Blutdruckwerte bei Versuchsabbruch an beiden Geräten auf. 8 Probanden = 40 % hatten Differenzen von 20 - 45 mm Hg, wobei die unterschiedlich erhöhten Werte sowohl am Laufband, als auch am Fahrradergometer gefunden wurden (s. Abb. 14).

Der diastolische Blutdruck ist bei 87 % der Probanden bei der Laufbandarbeit deutlich erniedrigt, was mit einer Signifikanz von 99,9 % ($t = 5,53$) gesichert ist. Die für beide Versuchsanordnungen in der letzten Minute errechneten Sauerstoffpulswerte lassen ebenfalls höhere Werte bei der Laufbandergometerarbeit erkennen.

Berücksichtigt werden muß noch die Tatsache, daß aus apparativen Gründen eine maximale Ausbelastung am Laufband nicht in allen Fällen erfolgte. Einige Probanden hätten noch eine größere Arbeit bewältigen können. Diese Angabe stützt die Feststellung, daß mit Hilfe der Laufbandbelastung eine starke Ausbelastung des Prüflings möglich ist.

V. Energetische Betrachtungen

Bei der Laufbandarbeit geht im Vergleich zum Fahrradtest noch in erhöhter Weise die Reibungsarbeit als Komponente in die Gesamtbelastung ein. Zwar läßt sich die Hebearbeit (Zeit x Hubleistung) aus dem Körpergewicht, der Schrittgeschwindigkeit und dem Sinus des Anstellwinkels des Laufbandes, ähnlich wie beim Stufentest, relativ genau bestimmen, doch erreicht der Arbeitsaufwand durch das schnelle Gehen in der horizontalen Komponente eine solche Größe, daß sie einen großen Teil der aufzuwendenden Gesamtarbeit beansprucht. Die sog. Hubleistung $T_{\text{Hub.theor.}}$ berechnet sich nach der Gleichung

$$T_{\text{Hub.theor.}} = G \times g \times v \times \sin d \quad [\text{Watt}]$$

wenn G das Körpergewicht, g die Erdbeschleunigung, v die Laufgeschwindigkeit des Bandes und d den Anstellwinkel bedeuten. Für verschiedene Werte der sog. Hubleistung können somit v und d variiert werden. Aus gleichen Beträgen für die Hubleistung bei verschiedener Geschwindigkeit bzw. Neigung folgt, daß sich die Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Sinuswerte der Anstellwinkel verhalten müssen. Die aus dem Körpergewicht, der Laufgeschwindigkeit und den Anstellwinkel errechnete Hubleistung ist in allen Fällen der Versuchsserie I bedeutend kleiner als der aus dem Sauerstoffverbrauch errechnete Differenzbetrag aus der Totalleistung (T)- Horizontalleistung (T_H), wie Tab. XV zeigt. Im Mittel beträgt der theoretisch errechnete Wert der Hubleistung $T_{\text{Hub.theor.}}$ nur 35 % des Differenzwertes $T - T_H$. Eine geometrische Differenzbildung $(T^2 - T_H^2) \times 1/2$ ergäbe noch einen niedrigeren Betrag. Von der effektiv für die Hubleistung aufzubringenden Energie werden also nur 35 % in Hebearbeit umgesetzt. 65 % der Energie werden im Mittel als Umsetzungs-, Reibungs- und Wärmeenergie verbraucht.

Tab. XV Belastung und Energieverbrauch

Belastung 4,5 km/h	Totalleistung (über O ₂ -Ver- brauch errech- net) T	T - T _h T _{Hub.eff.}	Hubleistung T _{Hub.theor.} (G.g.v. sind)	Wirkungs- grad Mittelwert: 35 %
0°	T _h = 323 W			
2°	384 W	61 W	31,5 W	51,6 %
4°	479 W	156 W	61,5 W	39,4 %
6°	590 W	267 W	92,2 W	34,5 %
8°	727 W	404 W	122,8 W	30,4 %
10°	885 W	562 W	153,5 W	27,3 %
12°	1049 W	726 W	183,2 W	25,2 %

Die Berechnung des Wirkungsgrades erfolgt nach folgender For-
mel:

$$\eta = \frac{T_{\text{Hub.theor.}}}{T_{\text{Hub.eff.}}} \%$$

Der auf diese Weise ermittelte Wirkungsgrad muß als maximal
erreichbarer Wert angesehen werden, da der anaerobe Leistungs-
anteil nicht berücksichtigt wurde.

Nach H.J. RALSTON ¹¹⁾ besteht eine lineare Beziehung zwischen
der aufzubringenden Laufenergie (in cal/min und kg) und der
2. Potenz der Geschwindigkeit (m/min) bei einem Neigungswin-
kel von Null Grad.

Diese Beziehung lautet:

$$E_W = 29 + 0,0053 v^2 \text{ (cal/min/kg)}$$

Nach dieser Gleichung resultiert für eine Geschwindigkeit von 4,5 km/h oder 75 m/min ein Energiewert von 58,8 cal/min und kg. Im Vergleich dazu läßt sich aus dem Sauerstoffverbrauch bei horizontaler Laufbandarbeit für jede Person ein Energiewert berechnen (Tab. XV), der vorliegenden Untersuchungen in jedem Fall höher liegt, im Mittel um 5,5 cal/min/kg.

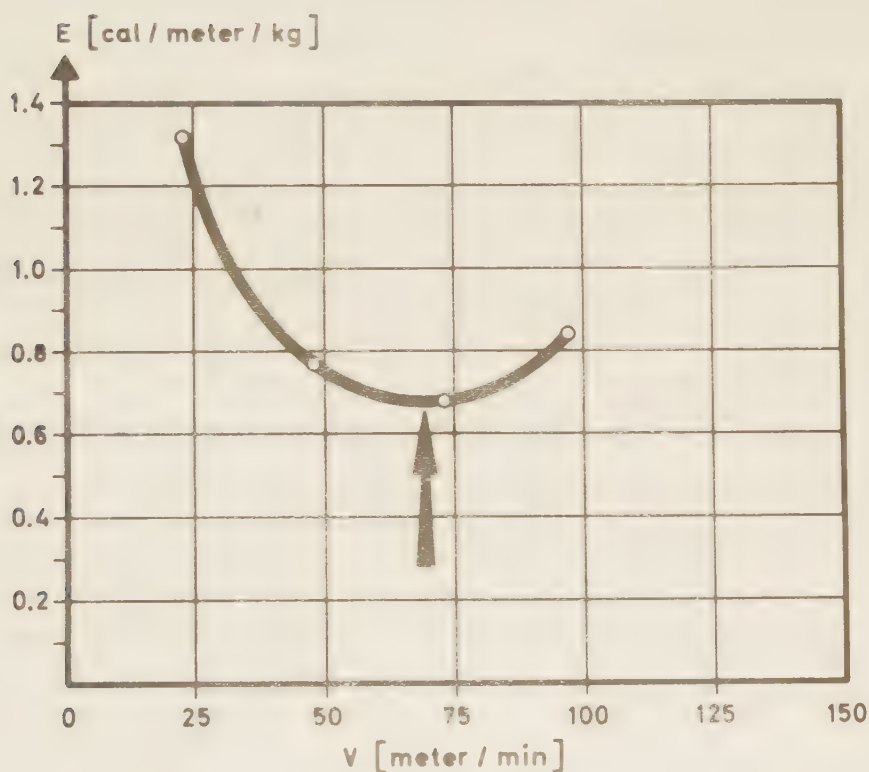


Abb. 15 Die Abhängigkeit der aufzuwendenden Energie von der Schrittgeschwindigkeit beim horizontalen Gehen. Der Pfeil ↑ zeigt die optimale Schrittgeschwindigkeit an. (nach RALSTON 11).

RALSTON wählte für seine Untersuchungen 19 Personen im Alter von 22 bis 51 Jahren aus, darunter 7 Frauen. Bei unseren 170 männlichen Probanden lag das Lebensalter zwischen 20 und 25 Jahren.

Durch Division der RALSTON'schen Energiegleichung mit v entsteht ein Ausdruck für die Energie in cal/m/kg.

$$\frac{E_w}{v} = \frac{29}{v} + 0,0053 v \left[\frac{\text{cal}}{\text{kg} \times \text{m}} \right]$$

In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt, hat die Energie-Kurve ein Minimum von 0,68 cal/m/kg bei 75 m/min (s. Abb. 15). Bei 75 m/min ist $E = 0,69$ cal/m/kg.

D. Diskussion

Als Voraussetzung für die Gültigkeit quantitativer Leistungsprüfungen ist zu fordern, daß nur solche Untersuchungsmethoden angewendet werden, die objektiv (geringe Fehlerbreite!), absolut unschädlich und jederzeit reproduzierbar sind.

Aufgabe einer spiroergometrischen Untersuchung ist es, mit Hilfe der während einer definierten Belastungsprüfung gemessenen Kreislauf- und Ventilationsgrößen einen Einblick in die Regulationsökonomie der verschiedenen Funktionskreise zu gewinnen, um damit die Leistungs- und Belastungsfähigkeit des Prüflings beurteilen zu können. Die Untersuchungen können unter sog. steady state als auch unter vita maxima-Bedingungen erfolgen.

Dabei wird man im Einzelnen bei der Fragestellung nach der maximalen Leistungsfähigkeit z.B. beim Sportler die vita maxima-Arbeit anwenden, während zur Klärung der Belastbarkeit im täglichen Leben die steady-state Methode zu bevorzugen sein wird. Bei der vita maxima-Arbeit, die eine höchste energetische Entfaltung mit maximaler Beanspruchung des kardio-pulmonalen Systems darstellen soll, sind die bei der Höchstleistung gemessenen Parameter von Bedeutung, da nur diese eine Aussage geben können über die maximale Leistungsfähigkeit.

Bei der steady state-Arbeit sind weit mehr als die absolut gemessenen Werte das Verhältnis der einzelnen Parameter zueinander von Bedeutung, wie es am besten durch Bestimmung sog. Äquivalentwerte (respiratorischer Quotient, Atemäquivalent, Sauerstoffpuls) möglich ist (REINDELL, KIRCHHOFF). Dabei sollten unter sog. steady state-Bedingungen die gemessenen Kreislauf- und Ventilationselemente sich nach einer bestimmten Anlaufzeit mindestens 5.- 10 Minuten im Gleichgewicht befinden, d.h. nur geringfügige Schwankungen aufweisen.

Eine steady state-Belastungsprüfung muß deshalb mindestens 10 - 15 Minuten lang in jeder Belastungsstufe durchgeführt werden. Somit ist eine derartige Prüfung eine zeitraubende Methode, man gewinnt aber nur auf diese Weise einen Einblick in das vorliegende Regulationsverhalten. Messungen ohne Garantie eines steady state sind unbrauchbar.

Offenbar sind sich einige Untersucher dieser Schwierigkeiten bewußt geworden, denn sie sind bemüht, während der für den Probanden ansteigenden Belastung wenigstens für eine sehr kurze Zeit eine Art steady state einzuhalten. So haben REINDELL und Mitarbeiter von BENGTSON den Begriff eines "relativen steady state" übernommen, den sie dann angewandt wissen möchten, wenn sie nach ca. 6 Minuten gleichbleibender Werte auf einer Stufe während 3 Minuten eine Konstanz für Sauerstoffaufnahme, Atmung und Herzfrequenz registrieren. Weil es aber recht fraglich ist, inwieweit man ein steady state noch relativieren darf, wurde ein neuer Begriff in Form einer "Ergostase" geprägt (MELLEROWICZ u. Mitarb. 1964), der also das offenkundige Fehlen eines echten steady state ersetzen soll, sich aber auf die Beobachtung von Atmung und Puls beschränkt. Wenn nun REINDELL u. Mitarb. durchschnittlich 6 Minuten auf einer Belastungsstufe arbeiten lassen, so nehmen die Untersuchungen mit fortlaufend gesteigerter Belastung doch eine erhebliche Zeit in Anspruch, mindestens 15 bis 20 Minuten. Bei solch einem Verfahren kann nicht ausgeschlossen werden, daß es nicht vorzeitig zu einer rein muskulären oder psychischen Erschöpfung des untrainierten Probanden kommt.

Also nimmt, verglichen mit dem soeben beschriebenen Verfahren, die steady state-Untersuchung gar nicht soviel Zeit in Anspruch, denn hier können wir uns mit einer einzigen Belastungsstufe begnügen und aus dem Verhalten der einzelnen Atem- und Kreislaufelemente zueinander wichtige Rückschlüsse auf die Atem- und Kreislaufregulation gewinnen (s. Tab. IV). Dabei hat sich die Laufbandbelastung als eine brauchbare Untersuchungsmethode erwiesen, die gegenüber der Belastungsprüfung am Fahrradergometer Vorteile bietet. Das Gehen auf dem Laufband ist

für den Probanden eine elementare Bewegungsart und physiologische Belastungsform, die keine ungewohnte Arbeitsleistung darstellt. Es wird eine bessere Ausbelastung des Prüflings als mit anderer Ergometerarbeit erreicht, die sich in der im Durchschnitt höheren Sauerstoffaufnahme sowie der im Mittel höheren Herzfrequenzen mit jeweils geringeren Streubereichen ausdrückt. Auch wird von Patienten betont, daß sie die Arbeit am Laufband als angenehmer empfinden als andere Belastungsarten.

Die meisten bisher untersuchten Kollektive (Nichtsportler) erreichten eine durchschnittliche maximale Sauerstoffaufnahme von 48 ml/kg/min. Multipliziert man diesen Wert mit dem jeweiligen Körpergewicht, so hat man eine Voraussage der maximalen Sauerstoffaufnahme. Die Sauerstoffaufnahmewerte, die mit vorliegenden Untersuchungen von dreißig 20 - 25jährigen untrainierten Probanden auf dem Laufband auf der höchsten Belastungsstufe von 4,5 km/h Schrittgeschwindigkeit und 12° (21 %) Steigung im steady state (!) registriert wurden, erreichten mit 43 - 4,5 ml/kg/min nahezu diesen maximalen Sauerstoffaufnahmewert. Dieses Ergebnis belegt die Feststellung einer besseren Ausbelastung mit dem Laufbandergometer.

In der deutschen Literatur wird die Laufbandbelastung mit einer gewissen Zurückhaltung beurteilt. Sie wird damit begründet, daß die Belastung nicht exakt dosierbar ist, und daß der Kraftaufwand nicht bei Null, sondern erst bei einer Kraft, die das Körpergewicht hebt, beginnt. Demnach sind niedrigste Arbeitsstufen nicht einstellbar. Große Leistungen, z.B. durch Erhöhung der Schrittgeschwindigkeit, verursachen eine unterschiedliche Koordination der Bewegung und damit Wirkungsgradunterschiede, die eine zusammenfassende Beurteilung erschweren. Auch ist die Ermittlung der Wattleistung schwierig, obwohl hierfür neue Geräte entwickelt wurden. Die Festlegung einer bestimmten Leistung nach Watt oder mkg/sek ist für eine Funktionsprüfung nicht immer notwendig. Die Aussage über die Größe der Leistungsfähigkeit im Verhältnis zu dem bewegten Körpergewicht ist wichtiger als absolute Aussagen über die Leistungsfähigkeit des motorischen Apparates. So kann man sich bei Angabe des Neigungswinkels und der Schrittgeschwindigkeit am Laufband ein Bild über die Arbeitskapazität des Prüflings

machen.

Aus vergleichenden spiroergometrischen Untersuchungen unter vita maxima-Bedingungen ist bekannt, wie sehr die maximal erreichten Werte von der Belastungsform abhängen.

So liegt nach MICHAELIS und MULLER die maximale Sauerstoffaufnahme beim Radfahren höher als bei der Kurbelarbeit, beim gleichzeitigen Radfahren und Kurbeln wiederum höher als beim Radfahren allein. CHRISTENSEN fand in vergleichenden Untersuchungen, daß derselbe Proband bei maximaler Armarbeit 3,0 l/min bei maximaler Fußarbeit dagegen 4,7 l/min Sauerstoff aufnehmen vermochte.

WYNDHAM et al. untersuchten die maximale Sauerstoffaufnahme an 40 jungen Nichtsportlern, und zwar mit Hilfe des Fahrradergometer-, Step-, unterbrochenen und fortlaufenden Laufbandtestes. Die mit dem Fahrradergometer erhaltenen maximalen Sauerstoffaufnahmewerte waren nur auf den niedrigen Belastungsstufen mit denen auf dem Laufband erreichten Werten vergleichbar, bei hohen Belastungen wurden signifikant niedrigere Sauerstoffaufnahmewerte registriert. Bei Anwendung des Stufentestes zeigte sich die Tendenz, die maximalen Sauerstoffaufnahmewerte bei hohen Belastungen zu überschätzen und bei niedrigen zu unterschätzen.

ROYELL und AGHEMO¹⁴⁾ fanden für die maximale Sauerstoffaufnahme mit Hilfe des Stufentestes bei einer Belastung, die einen Kalorienverbrauch von 250 cal/kg u. min aufwies. Mit diesem Energieverbrauch konnte auf dem Laufband ohne weiteres 10 min lang gearbeitet werden, dagegen mußte ein Stufentest mit dem gleichen Energieverbrauch nach 5 min wegen Erschöpfung abgebrochen werden.

Ebenfalls unterschiedliche Ergebnisse erhält man, wenn die Wattbelastung entweder auf das Körpergewicht, die aktive Körpermasse, die Körperoberfläche, die Körpergröße oder das Lebensalter bezogen wird.

Außerdem bestehen bei derselben Untersuchungsmethode noch Wirkungsgradunterschiede von Proband zu Proband. Ein Radrennfahrer wird bei der Fahrradergometrie selbst bei gleicher Belastung andere Sauerstoffaufnahmewerte und insbesondere einen besseren Wirkungsgrad aufweisen als ein Ungeübter. Für den Untrainierten ist außerdem noch zu fordern, daß die zu belastende Muskulatur wenigstens soweit trainiert ist, daß der Versuchsabbruch nicht aufgrund von Muskelschwäche bei noch ungenügender Ausbelastung des kardio-pulmonalen Systems erfolgt. Schließlich ist zu berücksichtigen, daß die vergleichende Betrachtung der einzelnen Parameter zueinander in der modernen

Funktionsdiagnostik eine große Bedeutung gewinnt. So werden insbesondere von sportmedizinischer Seite (REINDELL, HOLLMANN, MELLEROWICZ) die Sauerstoffpulswerte z.B. zum röntgenologisch bestimmbaren Herzvolumen in Beziehung gesetzt. Diese Quotienten, die wichtige Hinweise auf die Leistungsfähigkeit zulassen, müssen zwangsläufig ein falsches Bild ergeben, wenn man infolge Unterschieden in der Methode unterschiedliche Relationswerte erhält.

Diese Überlegungen sollten dazu führen, der Laufbandbelastung eine größere Bedeutung beizumessen. Für die meisten Begutachtungsfragen und die Anwendung im klinischen Bereich reicht eine einmalige Arbeitsleistung mit mittlerer Belastung aus, um die allgemeine Leistungsfähigkeit und die Regulationsökonomie von Kreislauf und Atmung zu beurteilen (KIRCHHOFF).

Je nach dem abzuklärenden Fall, Beurteilung eines Herzkranken, einer Rentenbegutachtung oder einer arbeitsphysiologischen Aufgabe, kann die Belastung durch Veränderung der Schrittgeschwindigkeit und des Neigungswinkels dosiert werden.

Dabei wird man für arbeits- und leistungsmedizinische Fragestellungen eine steady state-Untersuchung bei einer mittleren Belastung wählen, bei einer Steigung von $8^{\circ} = 14\%$ bzw.

$10^{\circ} = 17,4\%$ und einer Schrittgeschwindigkeit von 4,5 km/h.

Die Wahl einer Schrittgeschwindigkeit von 4,5 km/h ergibt sich aus dem II. Teil der vorliegenden Untersuchungen; hier wurden bei einer Schrittgeschwindigkeit von 7,5 bzw. 10,5 km/h an der Dauerleistungsgrenze geringere Sauerstoffaufnahme-werte registriert als bei 4,5 km/h.

Bei Herz-, Kreislauf- und Lungenerkrankten wird man den Neigungswinkel niedriger wählen bzw. die Schrittgeschwindigkeit herabsetzen. Hierbei haben sich bei der Vorprüfung am Laufband vor allem für die Festlegung einer Bewegungstherapie wertvolle Hinweise ergeben, weil man die Leistung, die noch keine gesundheitliche Gefährdung darstellt, exakter definieren kann und mehr objektive Unterlagen für die Durchführung der Bewegungstherapie gewinnt, wie bereits an anderer Stelle gezeigt wurde (KIRCHHOFF). Die gleichzeitige Mitregistrierung

des EKG gelingt ohne Schwierigkeiten (telemetrisch), desgleichen die minütliche Registrierung des Blutdrucks (s. unter Kapitel: Verwendete Apparaturen). Bei der Kontrolle der Bewegungstherapie ist vor allem das Absinken erhöhter diastolischer Blutdruckwerte von Bedeutung, sie sind ein wichtiges Hinweiszeichen für den Erfolg der Terrainkur im Sinne von OERTEL und BECKMANN bei Patienten mit hypertoner Blutdruckeinstellung.

Bei der vergleichenden Untersuchung zwischen der vita maxima-Belastung am Fahrrad- und Laufbandergometer war besonders auffällig, daß bei der Laufbandbelastung die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme größer, die Streubreite der Sauerstoffaufnahmewerte kleiner war als am Fahrradergometer. Die jeweils an beiden Geräten erreichten größten O_2 -Aufnahme-Einzelwerte waren fast gleich (4520 u. 4430 ml).

Die in Tabelle XIII zusammengestellten Ergebnisse zeigen, daß die Probanden, die am Laufband eine deutlich gesteigerte maximale Sauerstoffaufnahme aufweisen, gleichzeitig auch eine auffällig höhere Pulsfrequenz besitzen als bei der Fahrradergometrie.

Die größere maximale O_2 -Aufnahme bei vita maxima-Untersuchungen am Laufband ist wahrscheinlich bedingt durch einen stärkeren Anstieg des Herzminutenvolumens infolge einer gesteigerten Herzfrequenz gegenüber der fahrradergometrischen Belastung. Es muß also hier nochmals auf die stärkere Ausbelastung durch Laufbandarbeit hingewiesen werden. Zusammenfassend führen die aufgezeigten Untersuchungen zu der Schlußfolgerung, daß mit der Laufband-Spiroergometrie eine Untersuchungsmethode zur Verfügung steht, die verwertbare, objektive Befunde zur Funktionsdiagnostik von Herz und Kreislauf liefert, und deren Vorteile bei der Diskussion um die optimale Belastungsart mehr Erwähnung finden sollten.

E. Zusammenfassung

1. An einer Versuchsserie mit insgesamt 170 jungen Offiziersanwärtern wurden die sog. Normalwerte der einzelnen Ventilations- und Kreislaufgrößen bei einer konstanten Geschwindigkeit von 4,5 km/h und Steigungen von 0°, 2°, 4°, 6°, 8°, 10° und 12° ermittelt (s. Tab. IV).
Die einzelnen Parameter nehmen bei Steigungen bis zu 6° - 8° mäßiger zu als im Bereich von 8° - 12°.
2. Eine zweite Untersuchungsreihe mit 3 Probanden zeigt das Verhalten der einzelnen Parameter bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Für Belastungsprüfungen am Laufband ist eine Schrittgeschwindigkeit von 4 - 5 km/h am geeignetsten. Bei höheren Geschwindigkeiten werden geringere Sauerstoffaufnahme-werte an der Dauerleistungsgrenze erreicht.
3. Eine vergleichende Untersuchung über die maximale Leistungsfähigkeit bei Laufband- und Ergometerarbeit an 20 Probanden zeigte, daß fast in allen Untersuchungen eine deutlich vermehrte Sauerstoffaufnahme am Laufband besteht, die z.T. mehr als 1000 ml beträgt. Bei dem größeren Teil der Probanden überwiegen die maximal erreichten AMV-Werte ebenfalls während der Laufbandbelastung. Die maximal erreichten Herzfrequenzen streuen bei der Fahrradergometer-Belastung wesentlich stärker und sind im Durchschnitt am Laufband um 13 Schl/min höher.
4. Die Laufbandergometerarbeit hat gegenüber anderen Verfahren Vorteile:
 - a) Es handelt sich um eine elementare Bewegungsform, d.h. eine physiologische Belastungsform, die für den Probanden keine ungewohnte Arbeitsleistung darstellt.
 - b) Man erhält eine bessere Ausbelastung des Prüflings als bei anderer Ergometerarbeit.
 - c) Patienten empfinden die Arbeit am Laufband angenehmer als andere Belastungsprüfungen.

Flugmedizinisches Institut der Luftwaffe
Purstenfeldbruck
Cardiologische Abteilung

Name Vorname Dienstgrad
Alter Jahre Gewicht kg Körpergröße cm Einheit
PK Laufende Nr. Datum

Spiroergometrische Untersuchung

	Ruhe	Tourenzahl: Watt:	Tourenzahl: Watt:
Sauerstoffaufnahme ml/Min STPD			
Kohlensäureabgabe ml/Min STPD			
Respiratorischer Quotient			
Atemminutenvolumen l/min BTPS			
Atemäquivalent			
Pulsfrequenz f/Min			
Blutdruck mm Hg			
Sauerstoffpuls			

Beurteilung:

Akten - Nr.:

Flugmedizinisches Institut der Luftwaffe
Fürstenfeldbruck
Cardiologische Abteilung

Name: Vorname: Dienstgrad:
Alter: Jahre Gewicht: kg Körpergröße: cm Einheit:
PK: Laufende Nr.:

Ergometerbelastung

Horizontallage	Ruhe-Puls	Ruhe-Blutdruck	

Belastung Watt	Minu- ten	Puls	RR	Belastung Watt	Minu- ten	Fu +	RR
	1				1		
	2				2		
	3				3		
	4				4		
	5				5		
	6				6		
	7				7		
	8				8		
	9				9		
	10				10		

BITTE WENDEN !

Fürstenfeldbruck, den

Flugmedizinisches Institut der Luftwaffe
Fürstenfeldbruck
Cardiologische Abteilung

Name Vorname Dienstgrad
Alter Jahre Gewicht kg Größe cm Einheit
PK lfd.Nr.
Tourenzahl: 60 O₂ %

Cardiologische Untersuchung
Bestimmung der Vita maxima

[illegible]

G. L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

1. Astrand, P.-O.: Experimental studies of physical working capacity in relation to sex and age. Copenhagen, Munksgaard 1952
2. Bobbert, A.C.: Physiological comparison of three types of ergometry. Genf 1962, Schweiz.Z.f.Sportmed. 10
3. Balke, B.: Optimale körperliche Leistungsfähigkeit, ihre Messung und Veränderung infolge Arbeitsermüdung. Int.. Z. angew. Physiol. Bd. 15 (1954)
4. Hanson, J.S. and Tabakin, B.S.: Comparison of the circulatory response to upright exercise in 25 "normal" men and 9 distance runners. Brit. Heart J., 1965, 27, 211
5. Kirchhoff, H.W., Reindell, H., Gebauer, A.: Dtsch.Arch. klin.Med. 203 (1956)
6. Kirchhoff, H.W., Reindell, H.: Das Verhalten des respiratorischen Quotienten und des Atemäquivalentes bei Menschen unterschiedlicher Leistungsbreite im Belastungsversuch. Verh. dtsh. Ges. inn. Med. 62 (1956)
7. Kirchhoff, H.W.: Die Bedeutung von Äquivalentwertbestimmungen zur Erfassung der Leistungsfähigkeit. Z.ärztl. Fortb. 53 (1964) Nr. 5
8. Kirchhoff, H.W.: Praktische Funktionsdiagnostik des Herzens und Kreislaufs, Joh.Ambrosius Barth-Verlag, München 1965
9. Marx, H.H., Zühlke, H.E., Schütze, B.: Möglichkeiten und Grenzen der Ergometrie für klinische Fragestellungen. Z. f. Kreislaufforschg. 54, 41 (1965)
10. Mellerowicz, H., Hansen, G.: 1. Internationales Seminar für Ergometrie. Berlin 1965

11. Ralston, H.J.: Energy-speed relation and optimal speed during level walking. Int.Z.angew.Physiol.einschl.Arbeitsphysiol., Bd. 17 (1958)
12. Reindell, H., Schildge, E., Klepzig, H., Kirchhoff, H.W.: Kreislaufregulation. Eine physiologische, pathophysiologische und klin. Studie. Stuttgart: Thieme 1955
13. Reindell, H., Kirchhoff, H.W., Mushoff, K., Klepzig, H.: Das Sauerstoffäquivalent, ein Maßstab für die Beurteilung der Leistungsbreite von Herz und Kreislauf. Verh.dtsch.Ges. Kreisl. Forsch. 22 (1956)
14. Rovelli, E. and Aghemo, P.: Physiological characteristics of the "Step" exercise. Int.Z.angew.Physiol.einschl.Arbeitsphysiol. 20 (1963)
15. Shephard, R.J.: The relative Merits of the Step Test, Bicycle Ergometer, and Treadmill in the assessment of cardio-respiratory fitness. Int.Z.angew.Physiol.einschl.Arbeitsphysiol. 23 (1966)
16. Wirz, P.: Vergleichende Spiroergometrische Untersuchungen bei Sportlern. Schweiz.Z.Sportmed. Genf 13 (1965) 2
17. Wyndham, C.H., Strydom, N.B., Leary, W.P. and Williams, C.G.: Studies of the maximum capacity of men for physical effort. Int.Z.angew.Physiol. einschl. Arbeitsphysiol. 22 (1966)
18. Workman, J.M. and Armstrong, B.W.: Oxygen cost of treadmill walking. Journal of appl. Physiol., Vol. 18, Nr. 4 (1963)

L e b e n s l a u f

Am 1. März 1941 wurde ich, Wolfgang Drescher, in Krakau geboren. Meine Eltern sind der Professor Dr. rer. pol. Herbert Drescher und dessen Ehefrau Barbara, geb. Fritz. Ich besuchte die Volksschulen in Eberbach am Neckar und Weinheim a. d. Bergstraße und das Albertus-Magnus-Gymnasium in Viernheim/Hessen, wo ich 1961 das Zeugnis der Reife erhielt. Danach leistete ich den 18-monatigen Grundwehrdienst ab, den ich als Leutnant d.R. beendete.

Im Wintersemester 1962/63 begann ich dann mit dem Studium der Medizin an der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg, bestand hier 1965 die ärztliche Vorprüfung und wurde im Herbst 1968 nach 6 klinischen Semestern an der Ludwig-Maximilians-Universität in München das Staatsexamen ablegen. *Examen 18.12.68*

